

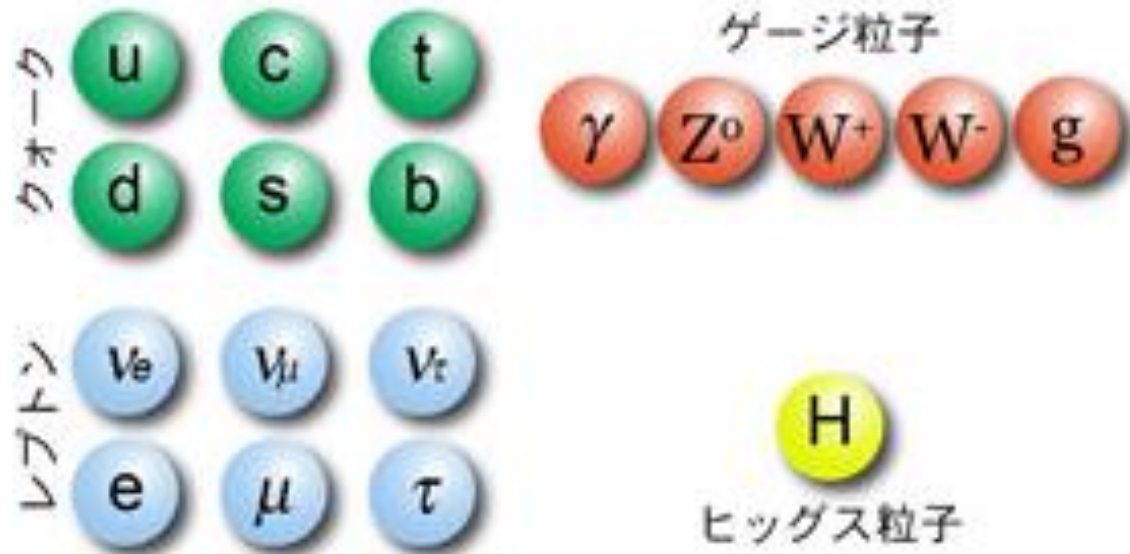
Belle(II)でのCPVの物理

東京大学相原・横山研/ICEPP

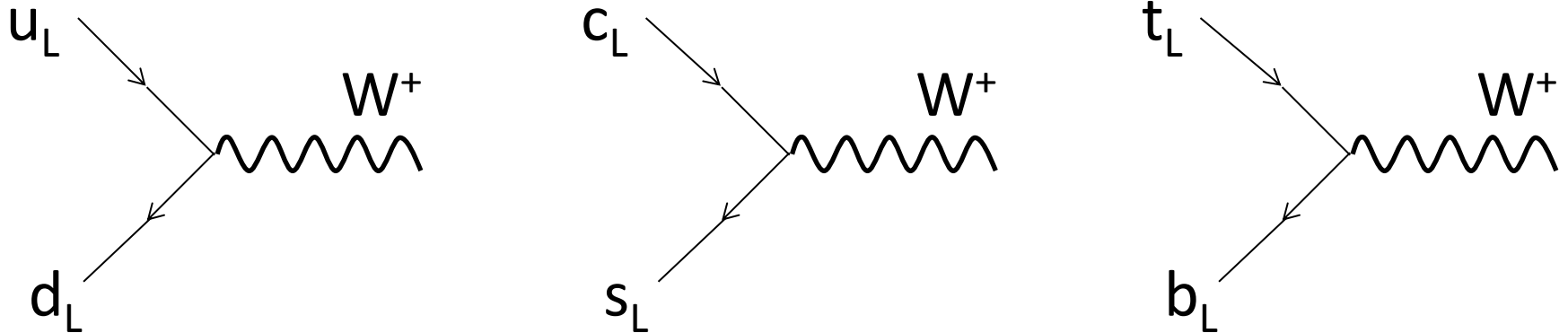
小貫良行

このスライドはBAS, CP festaなどの樋口さん、住澤さん、遊佐さん、原(K)さん、宮林さんのスライドを沢山にお借りしております。

素粒子標準理論



荷電カレント相互作用



ゲージ相互作用の固有状態は質量固有状態とは異なる。

$$\mathcal{L}_{CC} = \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^+ (\bar{u}_L \bar{c}_L \bar{t}_L) \gamma^\mu \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} + \text{h.c.}$$

$$u_i = (U_u)_{ik} u_k^{(m)}$$

$$d_i = (U_d)_{ik} d_k^{(m)}$$

質量固有状態
に書き直す

$$= \frac{g}{\sqrt{2}} W_\mu^+ \left(\bar{u}_L^{(m)} \bar{c}_L^{(m)} \bar{t}_L^{(m)} \right) \gamma^\mu \underbrace{U_u^\dagger \cdot U_d}_{\equiv V_{CKM}} \begin{pmatrix} d_L^{(m)} \\ s_L^{(m)} \\ b_L^{(m)} \end{pmatrix} + \text{h.c.}$$

カビボ小林益川行列

カビボ小林益川行列 V_{CKM}

N. Cabibbo, PRL.10, 531 (1963); M. Kobayashi and T. Maskawa, Prog. Theor. Phys. 49, 652 (1973).

I. I. Bigi and A. I. Sanda, Phys. Lett. B 211, 213 (1988).



$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

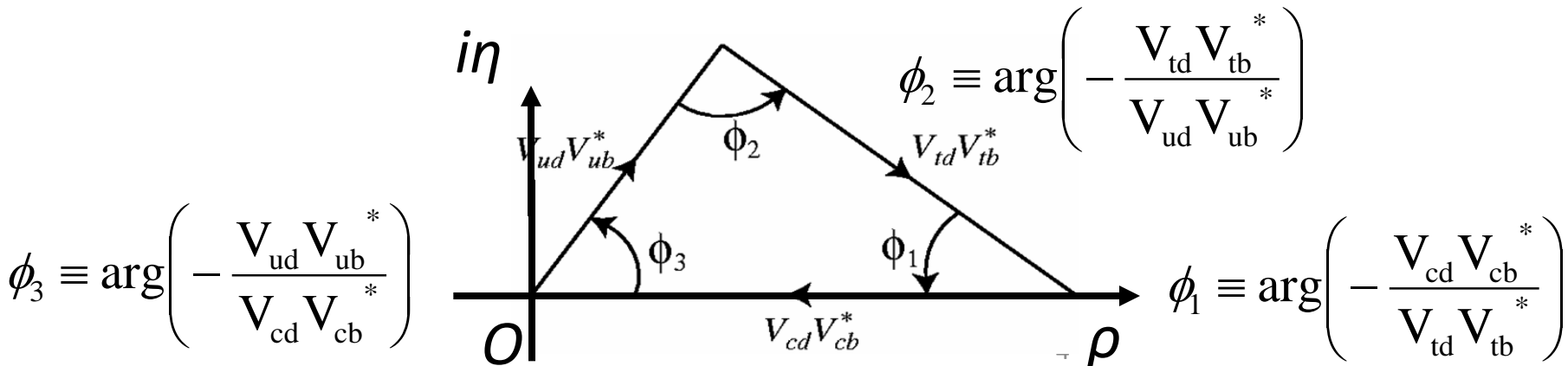
#of complex phase
 $= (n-1)(n-2)/2$

$$V_{CKM} \equiv \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

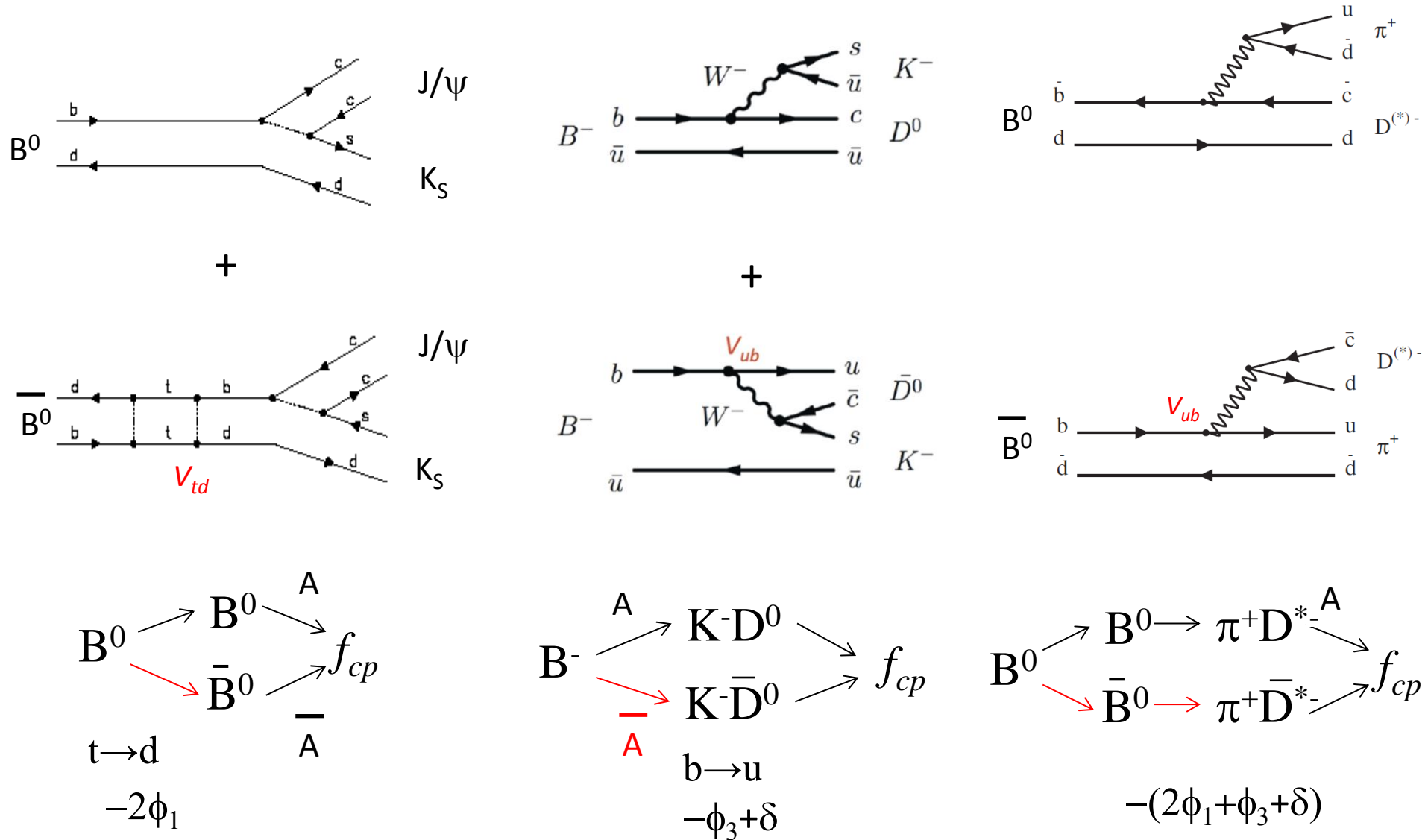
$\lambda \sim 0.22, A \sim 0.80$

対角成分 \rightarrow 大 (Favored)
 非対角成分 \rightarrow 小 (Suppress)

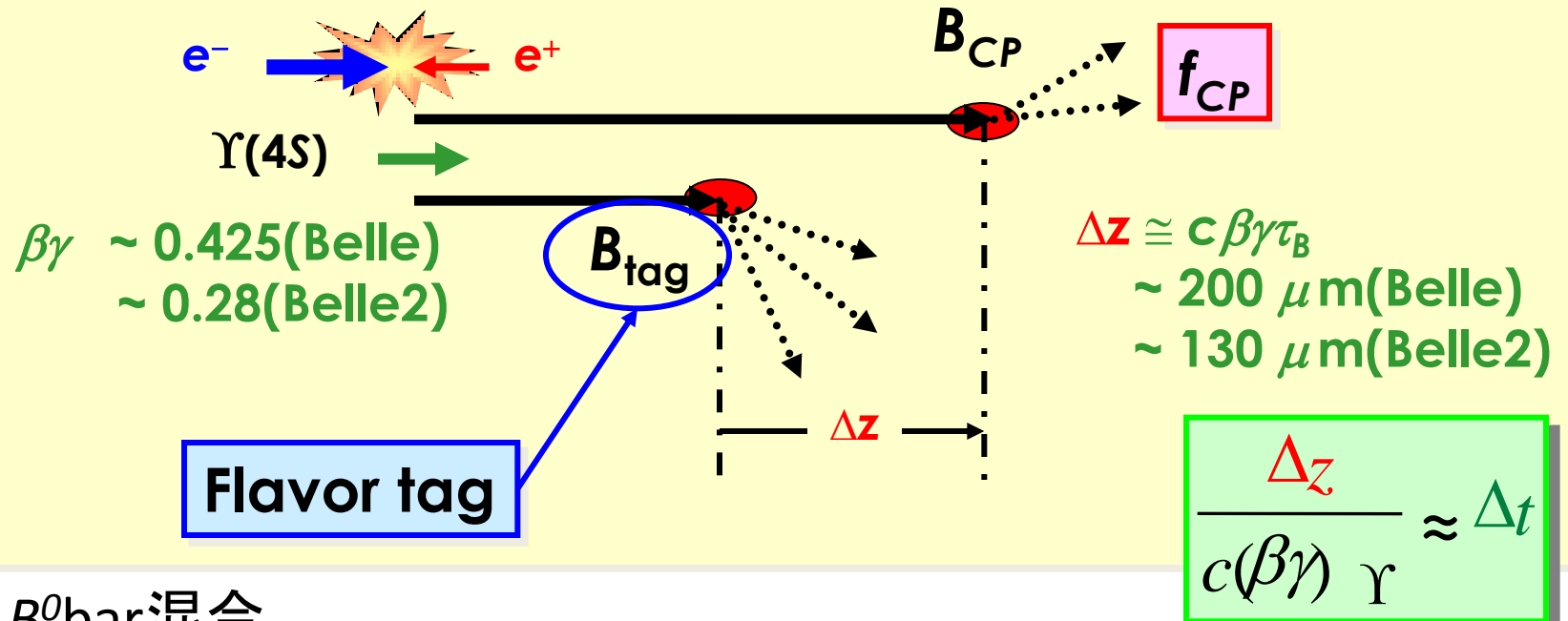
ユニタリー三角形 $V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$



$B^0-\bar{B}^0$ 混合と崩壊振幅と干渉



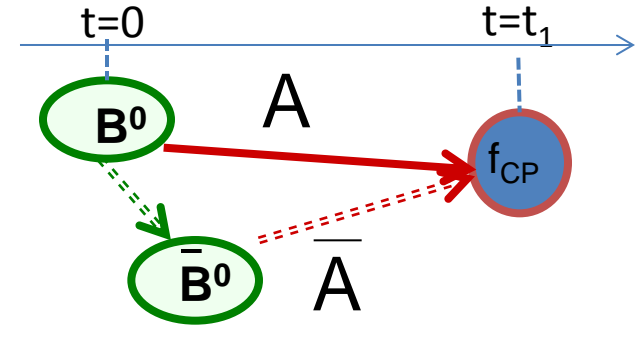
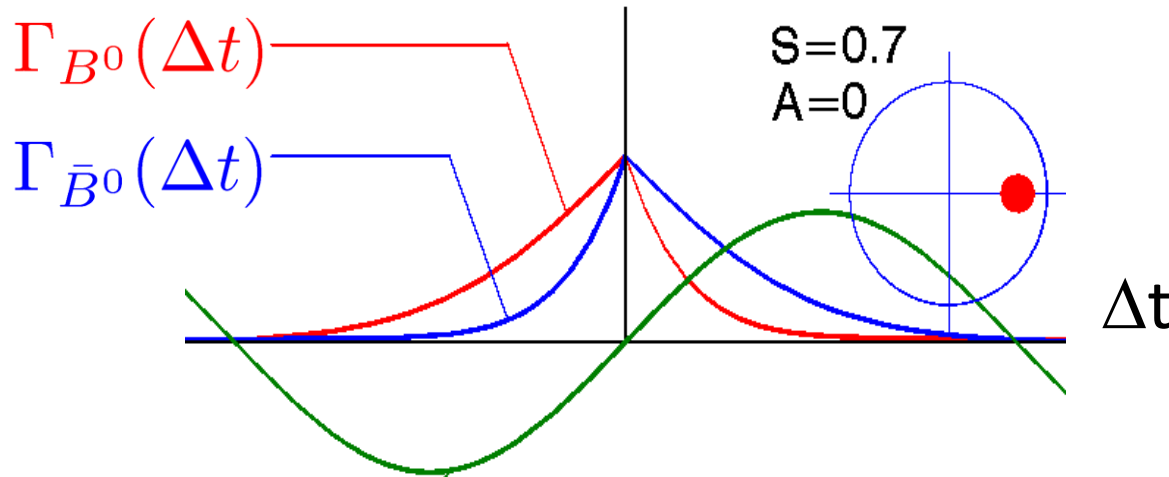
Belle(2)における時間依存CP測定(TCPV)



- B^0 - B^0 bar混合
- CP固有状態への崩壊 $B^0 \rightarrow f_{CP}$ を再構成
- もう一方の B^0 (B_{tag}) のフレーバーを同定 B_{tag} (flavor: B^0 or \bar{B}^0)
- Δz (崩壊点間の距離) から Δt (崩壊の時間差) 測定
- CPV測定には Δt とflavorが必要

$$\phi_1$$

CPV (CP非対称性)を時間差 Δt の関数として測定



B^0 - \bar{B}^0 混合により崩壊振幅の干渉が起きる

$$\begin{aligned}
 A_{CP}(\Delta t) & \equiv \frac{\Gamma_{\bar{B}^0}(\Delta t) - \Gamma_{B^0}(\Delta t)}{\Gamma_{\bar{B}^0}(\Delta t) + \Gamma_{B^0}(\Delta t)} \\
 & = S \sin \Delta m \Delta t + A \cos \Delta m \Delta t
 \end{aligned}$$

e.g. for $B^0 \rightarrow J/\psi K_s$
 $S = -\xi_{CP} \sin 2\phi_1 = +\sin 2\phi_1$
 $A \sim 0$ ($A = -C$)
 (ξ_{CP} : CP eigenvalue ± 1)

間接的CPの破れ 直接的CPの破れ

$$S = \frac{2 \operatorname{Im}(q/p \bar{A} A^*)}{|\bar{A}|^2 + |A|^2}, \quad A = \frac{|\bar{A}|^2 - |A|^2}{|\bar{A}|^2 + |A|^2}$$

ϕ_2

- 同じTCPV のフレームワークで測定可能
- 但しペンギンダイアグラムからの寄与でeffectiveにズレ
 - アイソスピン解析 $\pi^+\pi^-$ $\pi^+\pi^0$ $\pi^0\pi^0$ により真の ϕ_2 測定可能

PRL 65, 3381 (1990)

$$Br^{+-}, Br^{+0}, B^{00}, C^{00} (= -A^{00}), C^{+-}, S^{+-}, \rho(C^{+-}, S^{+-})$$

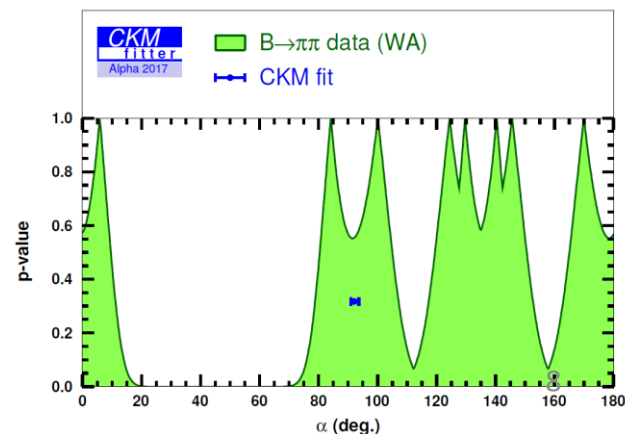
但し、 ϕ_2 に8 fold solution(8つの解)がつく

arXiv.1705.02981

- 8 fold solutionを解くには S^{00} が必要(全部 γ)

$\pi^0 \rightarrow \gamma e^+ e^-$ (Br \sim 1.2%) and/or 検出器をコンバータとして $\gamma \rightarrow e^+ e^-$
崩壊点を作る

[arXiv:hep-ex/0703039](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0703039)



ϕ_3

- 時間依存測定しなくても測定可能→直接的CPの破れ

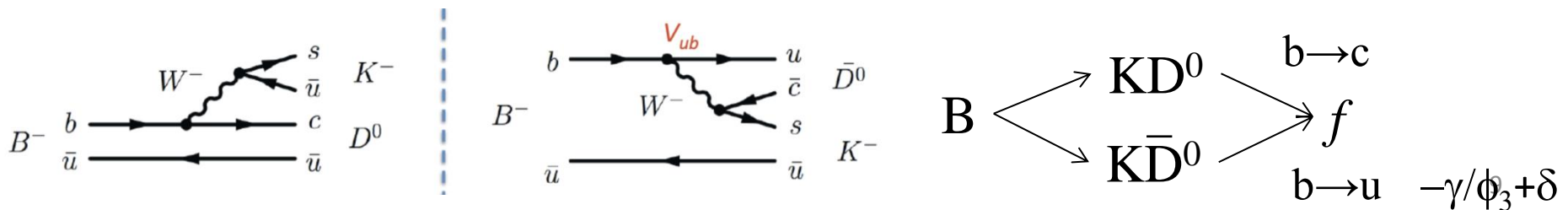
- Least well determined angle
- Theoretically very clean $|\Delta\gamma| \lesssim 10^{-7}$ JHEP01(2014)051
- Possible uncertainty
 - Direct CPV in D Not observed. EPJ.C(2013)73,2476
 - D-D mixing $|\Delta\gamma| \lesssim 1^\circ$ PRD 89, 014021 (2014)

- GGSZ(Dalitz)法、ADS法、GLW法を用いる.

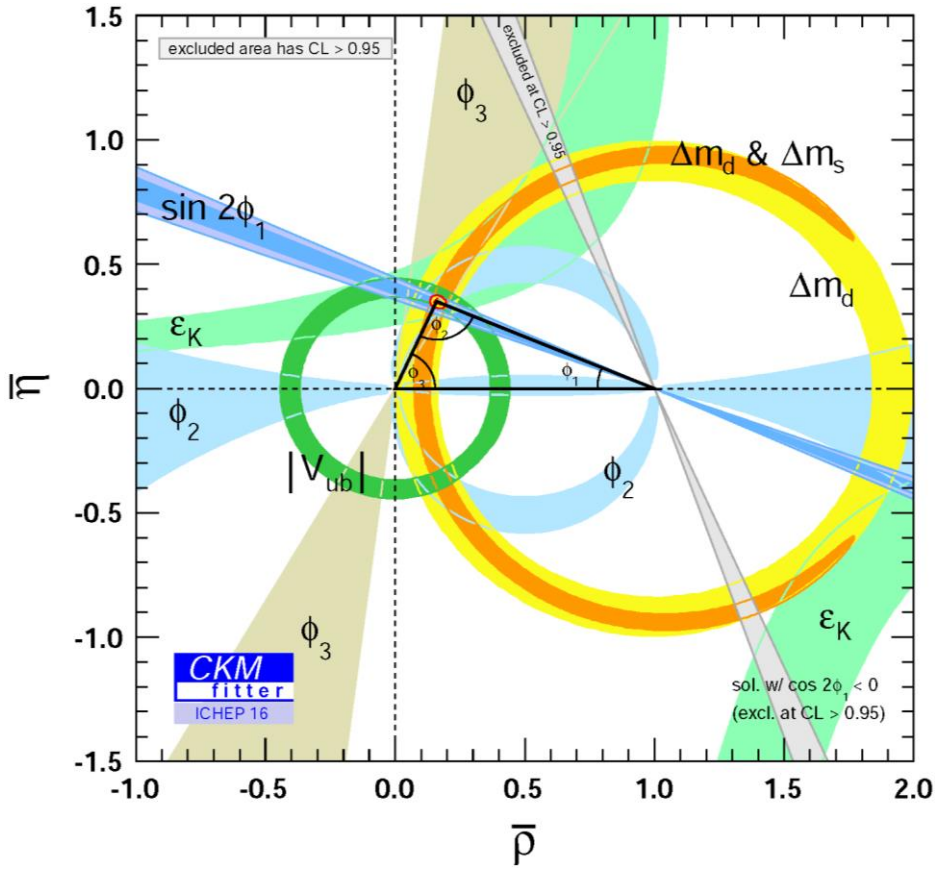
- Dalitz法はダイレクトに ϕ_3 測定可能
- ADS、GLWは ϕ_3 を含んだ連立方程式として測定可能
他実験(結果)からのインプットが必要

ツリー崩壊 $b \rightarrow c$ と $b \rightarrow u(V_{ub} \propto e^{-i\phi_3})$ の干渉を使う:

荷電 $B \rightarrow D^{(*)0}K^{(*)}$ あるいは self-tagな中性 $B^0 \rightarrow D^{(*)0}K^{*0} (K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-)$



現在のユニタリー三角形



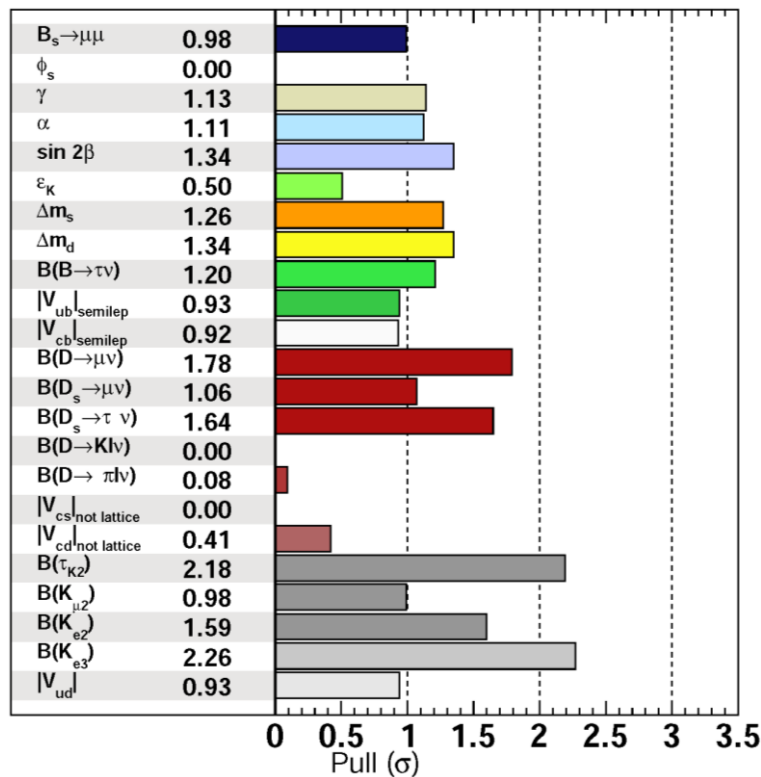
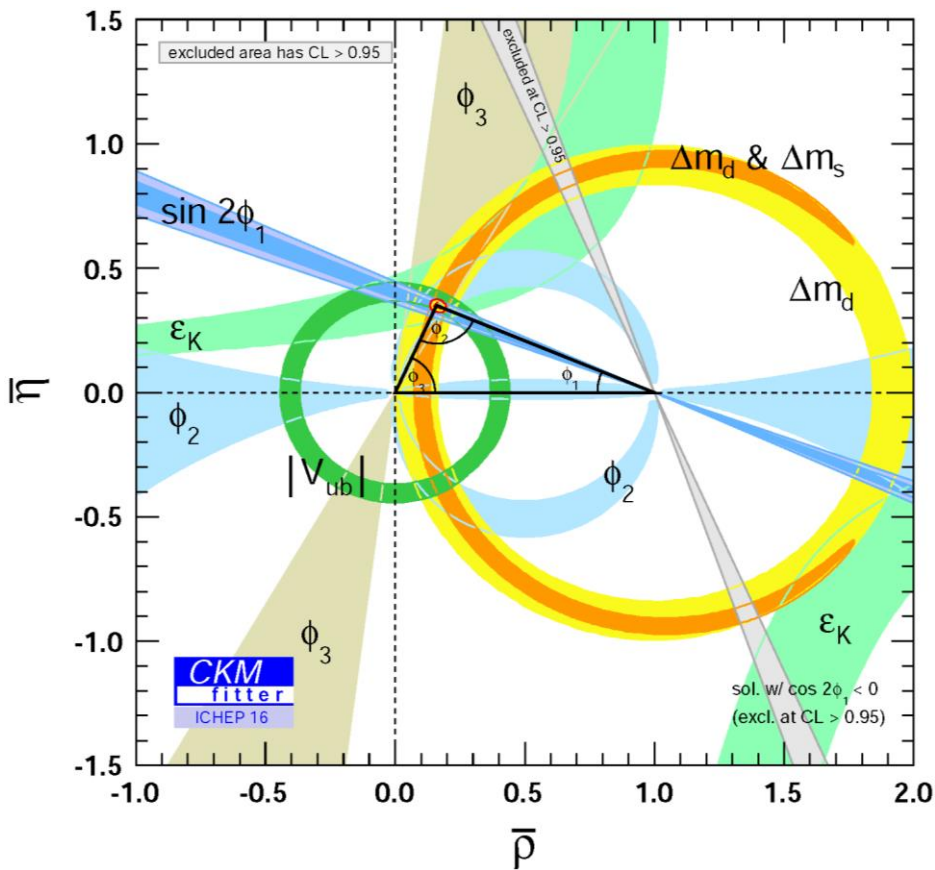
Parameter	Value \pm Error(s)
$ V_{ud} $ (nuclei)	$0.97425 \pm 0 \pm 0.00022$
$ V_{us} f_+^{K \rightarrow \pi}(0)$	0.2165 ± 0.0004
$ V_{cd} $ (νN)	0.230 ± 0.011
$ V_{cs} $ ($W \rightarrow c\bar{s}$)	$0.94^{+0.32}_{-0.26} \pm 0.13$
$ V_{ub} $ (semileptonic)	$(3.98 \pm 0.08 \pm 0.22) \times 10^{-3}$
$ V_{cb} $ (semileptonic)	$(41.00 \pm 0.33 \pm 0.74) \times 10^{-3}$
$\mathcal{B}(\Lambda_p \rightarrow p\mu^-\bar{\nu}_\mu)_{q^2>15}/\mathcal{B}(\Lambda_p \rightarrow \Lambda_c\mu^-\bar{\nu}_\mu)_{q^2>7}$	$(0.944 \pm 0.081) \times 10^{-2}$
$\mathcal{B}(B^- \rightarrow \tau^-\bar{\nu}_\tau)$	$(1.08 \pm 0.21) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}(D_s^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu)$	$(5.57 \pm 0.24) \times 10^{-3}$
$\mathcal{B}(D_s^- \rightarrow \tau^-\bar{\nu}_\tau)$	$(5.55 \pm 0.24) \times 10^{-2}$
$\mathcal{B}(D^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu)$	$(3.74 \pm 0.17) \times 10^{-4}$
$\mathcal{B}(K^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e)$	$(1.581 \pm 0.008) \times 10^{-5}$
$\mathcal{B}(K^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu)$	0.6355 ± 0.0011
$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow K^-\bar{\nu}_\tau)$	$(0.6955 \pm 0.0096) \times 10^{-2}$
$\mathcal{B}(K^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu)/\mathcal{B}(\pi^- \rightarrow \mu^-\bar{\nu}_\mu)$	1.3365 ± 0.0032
$\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow K^-\bar{\nu}_\tau)/\mathcal{B}(\tau^- \rightarrow \pi^-\bar{\nu}_\tau)$	$(6.431 \pm 0.094) \times 10^{-2}$
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu\mu)$	$(2.8^{+0.7}_{-0.6}) \times 10^{-9}$
$ V_{cd} f_+^{D \rightarrow \pi}(0)$	0.1425 ± 0.0019
$ V_{cs} f_+^{D \rightarrow K}(0)$	0.7226 ± 0.0034
$ \epsilon_K $	$(2.228 \pm 0.011) \times 10^{-3}$
Δm_d	$(0.5065 \pm 0.0019) \text{ ps}^{-1}$
Δm_s	$(17.757 \pm 0.021) \text{ ps}^{-1}$
$\sin(2\beta)_{[ce]}$	0.691 ± 0.017
$(\phi_s)_{[b \rightarrow c\bar{s}]}$	-0.030 ± 0.033
$S_{\pi\pi}^{+-}, C_{\pi\pi}^{+-}, C_{\pi\pi}^{00}, \mathcal{B}_{\pi\pi}$ all charges	Inputs to isospin analysis
$S_{\rho\rho,L}^{+-}, C_{\rho\rho,L}^{+-}, S_{\rho\rho}^{00}, C_{\rho\rho}^{00}, \mathcal{B}_{\rho\rho,L}$ all charges	Inputs to isospin analysis
$B^0 \rightarrow (\rho\pi)^0 \rightarrow 3\pi$	Time-dependent Dalitz analysis
$B^- \rightarrow D^{(*)}K^{(*)-}$	Inputs to GLW analysis
$B^- \rightarrow D^{(*)}K^{(*)-}$	Inputs to ADS analysis
$B^- \rightarrow D^{(*)}K^{(*)-}$	GGSZ Dalitz analysis

ϕ_1

ϕ_2

ϕ_3

現在のユニタリー三角形

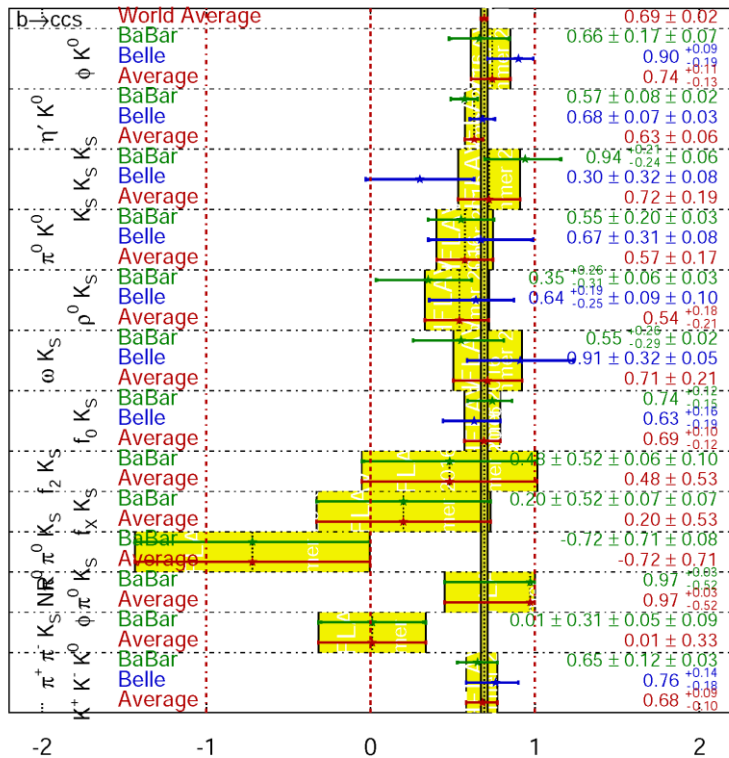


Decay mode	$\sin 2\phi_1 \equiv -\xi_f S_f$	A_f
$J/\psi K_S^0$	$+0.670 \pm 0.029 \pm 0.013$	$-0.015 \pm 0.021^{+0.045}_{-0.023}$
$\psi(2S) K_S^0$	$+0.738 \pm 0.079 \pm 0.036$	$+0.104 \pm 0.055^{+0.047}_{-0.027}$
$\chi_{c1} K_S^0$	$+0.640 \pm 0.117 \pm 0.040$	$-0.017 \pm 0.083^{+0.046}_{-0.026}$
$J/\psi K_L^0$	$+0.642 \pm 0.047 \pm 0.021$	$+0.019 \pm 0.026^{+0.017}_{-0.041}$
All modes	$+0.667 \pm 0.023 \pm 0.012$	$+0.006 \pm 0.016 \pm 0.012$

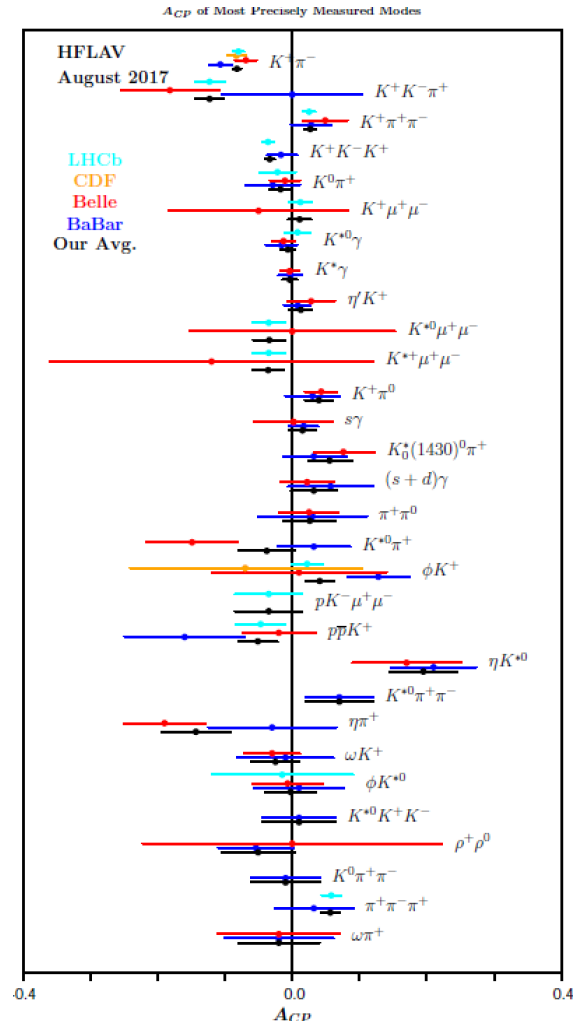
Pulls(σ) = $\Delta\chi^2 = \chi^2_{w/data} - \chi^2_{w/o data}$
 今のところ tension なし

CPVを用いた新物理探索

$$\sin(2\beta^{\text{eff}}) \equiv \sin(2\phi_1^{\text{eff}}) \quad \text{HFLAV Summer 2016}$$

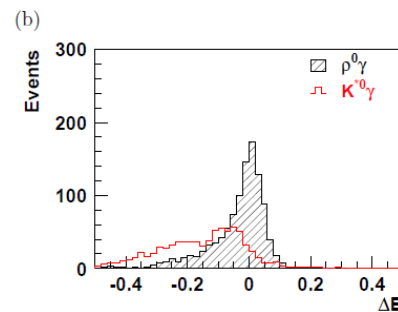
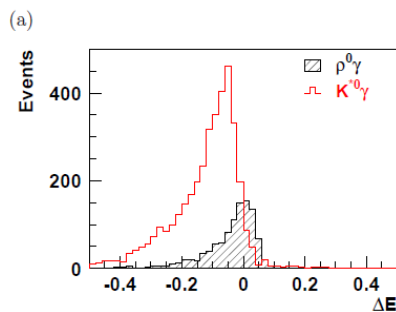
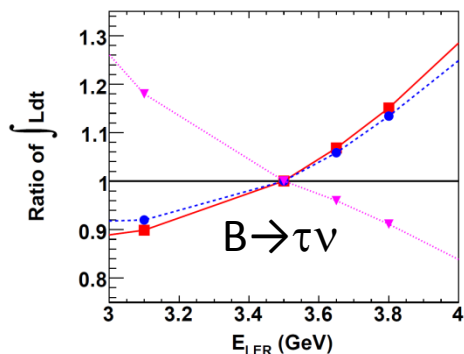
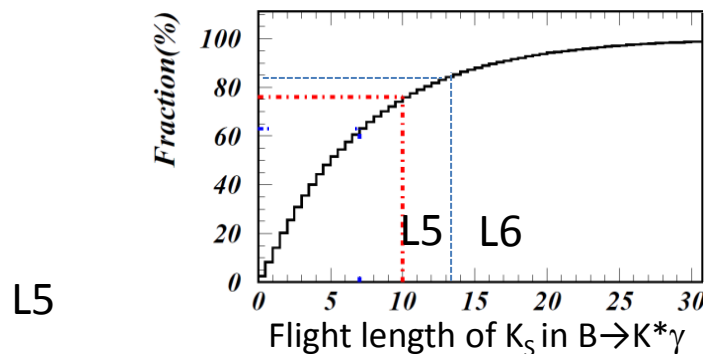
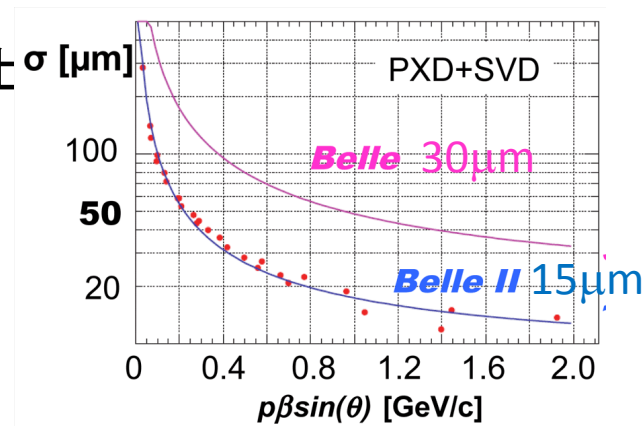


$b \rightarrow s\bar{s}s$

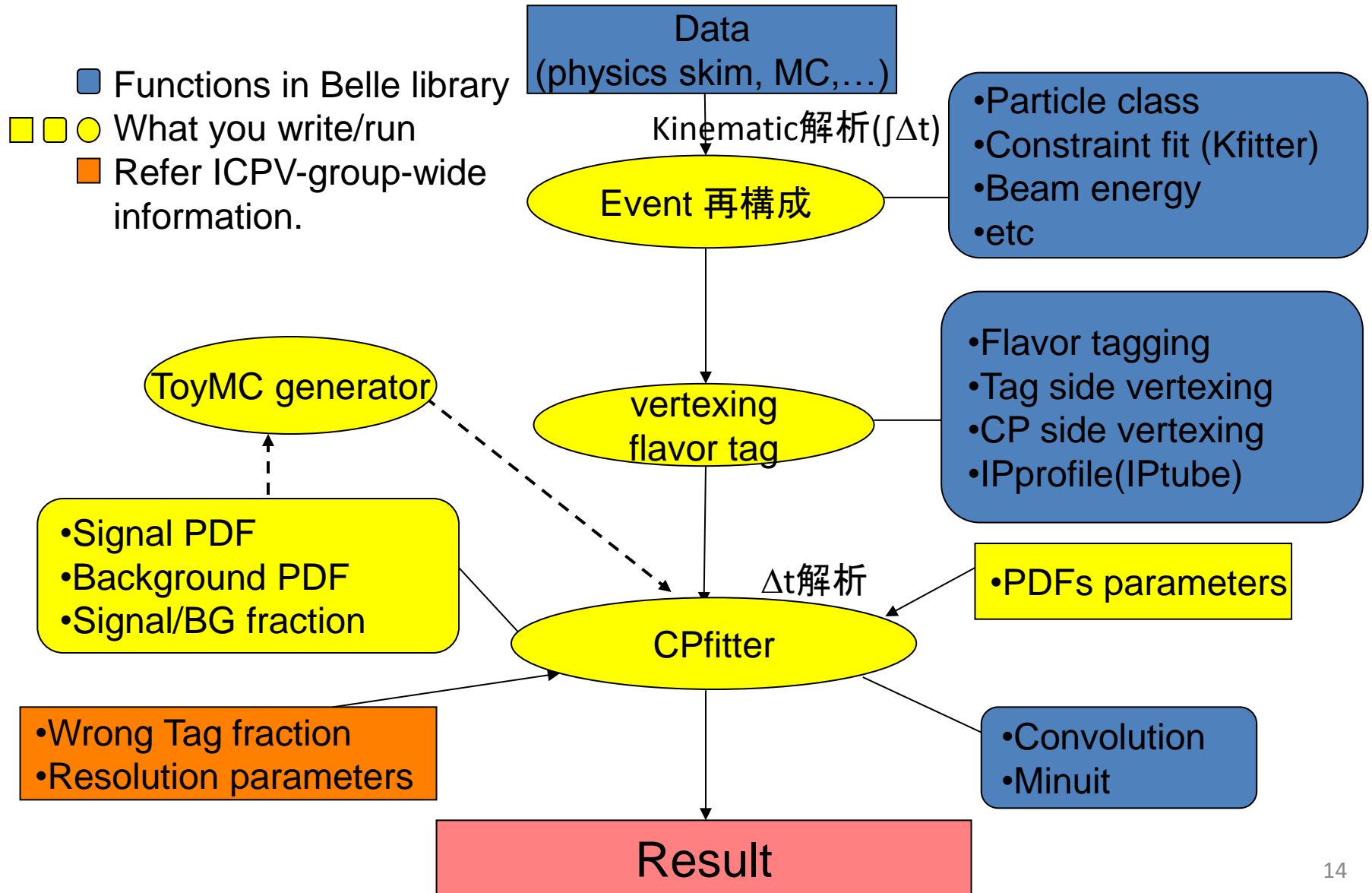


新物理探索 Bench mark modes

- $B \rightarrow \phi K_S \sin 2\phi_1^{\text{eff}}$
 - $\beta\gamma = 0.425 \rightarrow 0.28$, 飛程 \rightarrow 短。しかし分解能 factor 2 向上
 - トータルで精度向上
- CPV in $B \rightarrow [K_S \pi^0]_{K^*} \gamma$ and so on
 - 崩壊点検出器外層2層内
 - K_S 崩壊割合 60% \rightarrow 75% (当社比)
- $B \rightarrow K\pi$, $B \rightarrow \rho\gamma$ and so on
 - K/π 粒子(誤)識別効率 90%(11%) \rightarrow 97%(2%)
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ finding eff 向上
- $B \rightarrow \tau\nu$
 - acceptance 18% 増



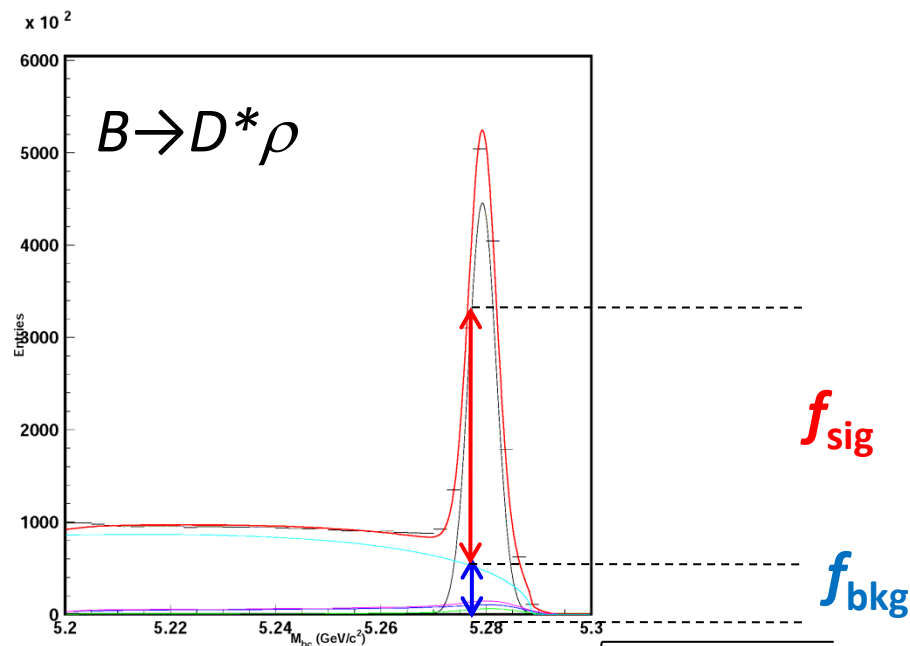
BelleでのTCPV解析の実際



信号純度purityと信号確率

信号確率

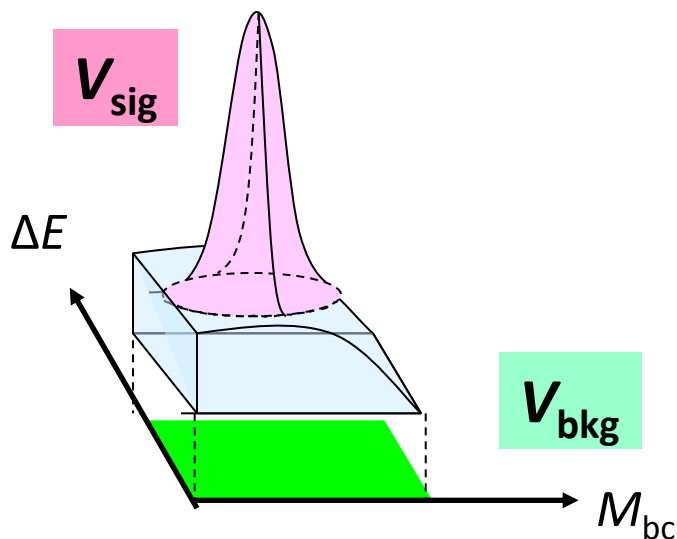
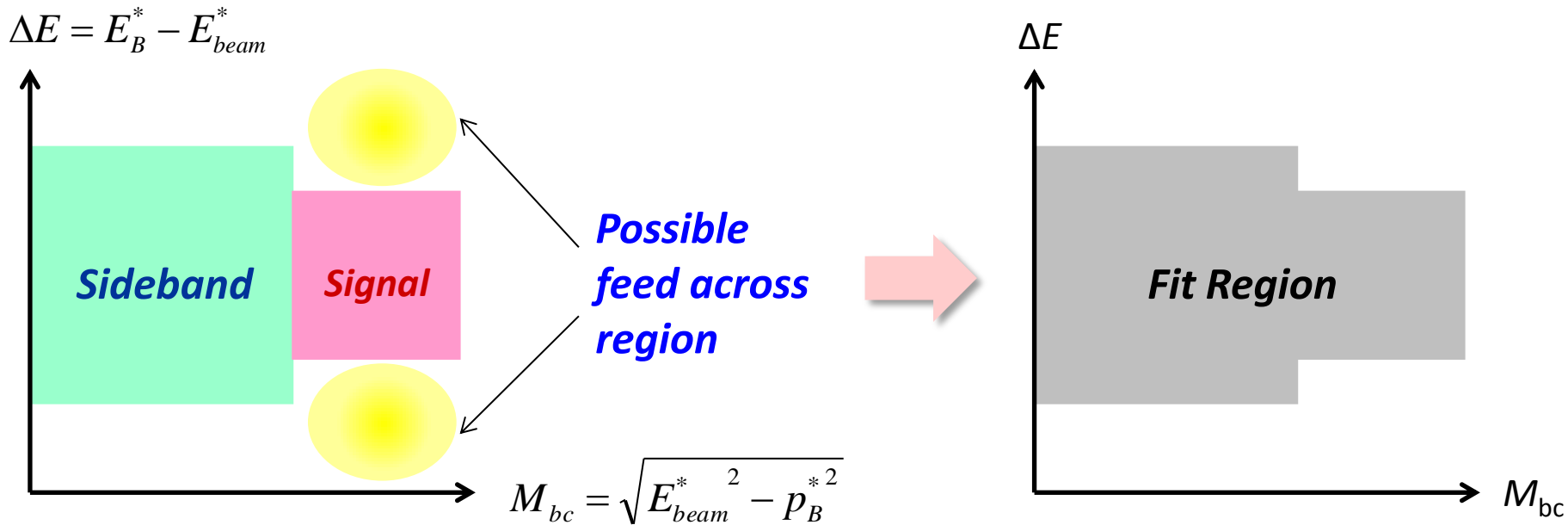
- Event-by-event signal probability f_{sig}
イベント毎に重みをつける



$$\text{Beam constraint mass } M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^{*2} - p_B^{*2}}$$

- The f_{sig} and f_{bkg} are normalized to $f_{\text{sig}} + f_{\text{bkg}} = 1$.

信号純度 Signal purity



$$\text{Purity} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_{sig}^i \xrightarrow{N \rightarrow \infty} \frac{V_{sig}}{V_{sig} + V_{bkg}}$$

一般的に

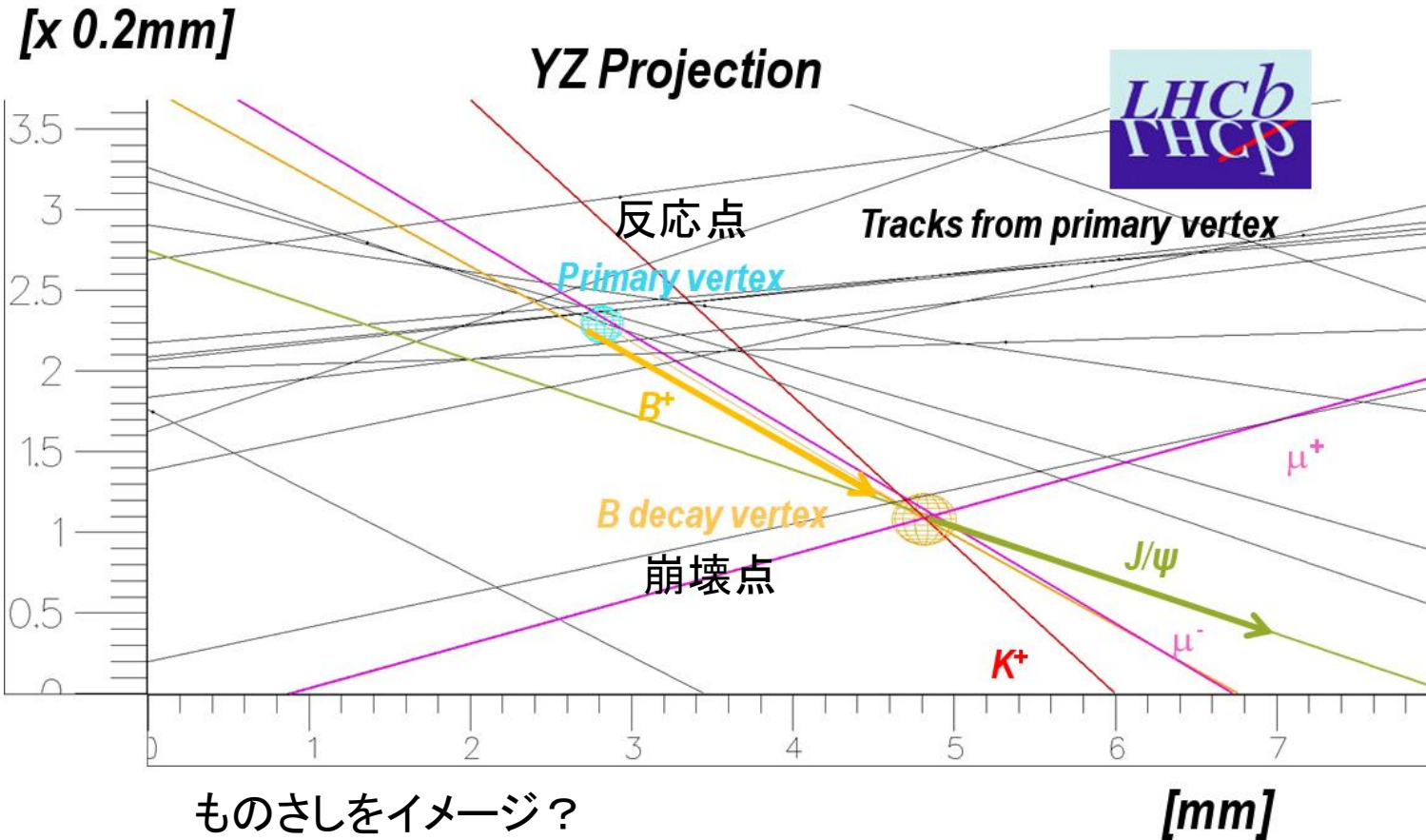
$$V_{sig}^{Belle(2)} < V_{sig}^{LHCb}$$

$$V_{bkg}^{Belle(2)} < V_{bkg}^{LHCb}$$

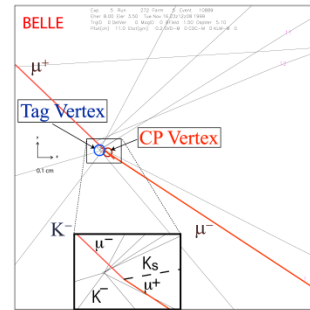
$$\text{Purity}_{Belle(2)} > \text{Purity}_{LHCb} \quad 17$$

Resolution function

LHCb and Belle(2) side by side



$B^0 \rightarrow J/\psi K_S$

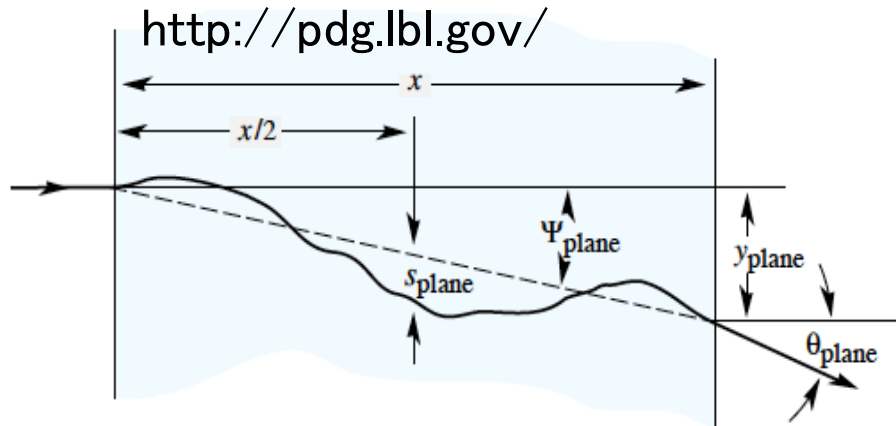


$$t_{B^+}/t_{B^0} \sim 1.076.$$

LHCb: B中間子飛程 $\sim 2\text{mm}$

Belle(2): B中間子飛程 $\sim 0.2\text{mm}$

事象ごとの分解能見積もり

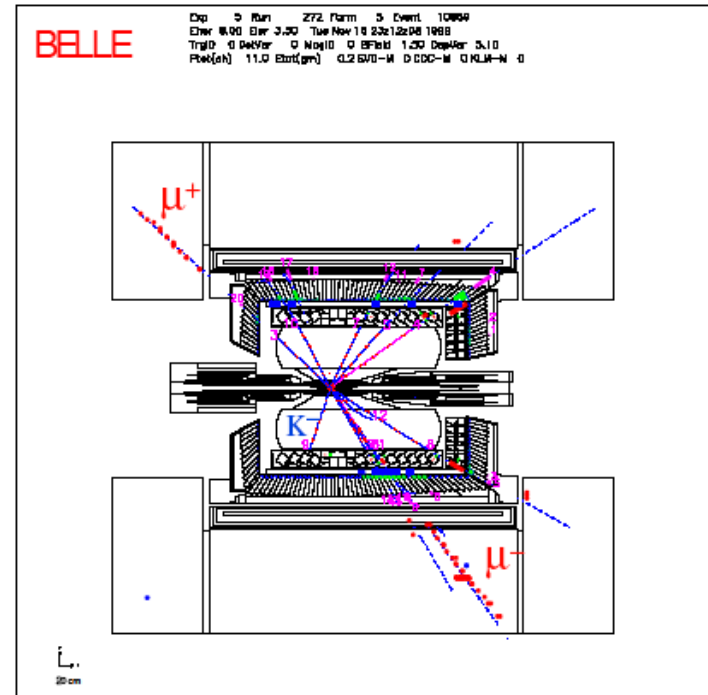


$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} z \sqrt{x/X_0} \left[1 + 0.038 \ln(x/X_0) \right]$$

$$\psi_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \theta_0 ,$$

$$y_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{3}} x \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{\sqrt{3}} x \theta_0 ,$$

$$s_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{4\sqrt{3}} x \theta_{\text{plane}}^{\text{rms}} = \frac{1}{4\sqrt{3}} x \theta_0 .$$



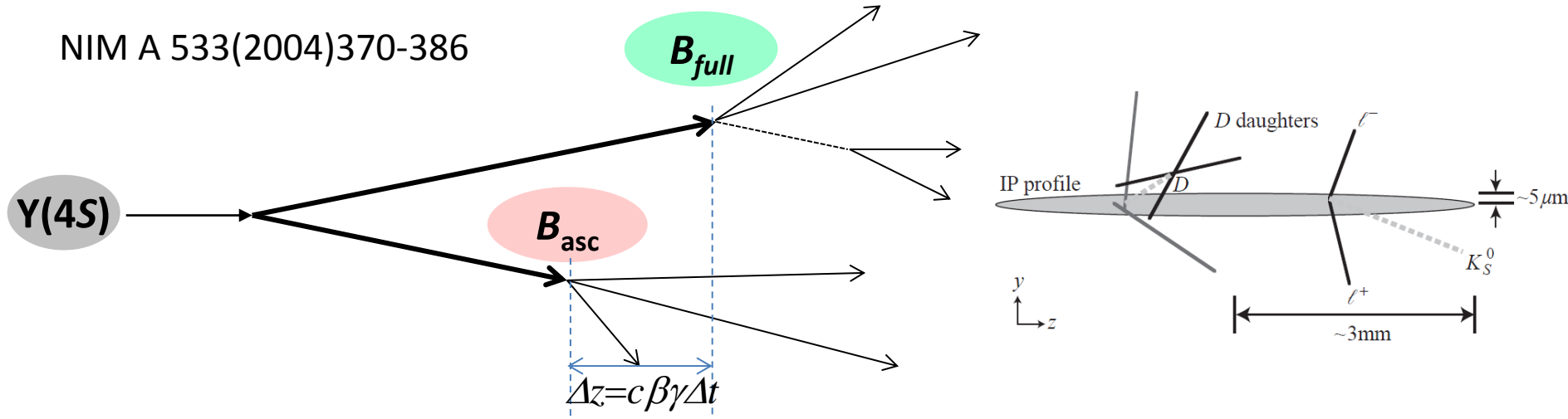
物質を通過中の軌跡の乱れは運動量が下がったり物質質量が増えると大きくなる

Belle(2) 典型的な粒子運動量 $\lesssim 1\text{GeV}$
 c.f. LHCb 典型的な粒子運動量 $\lesssim 100\text{GeV}$

通過物質質量による多重散乱の影響(分解能関数)を事象ごとに正しく見積る必要

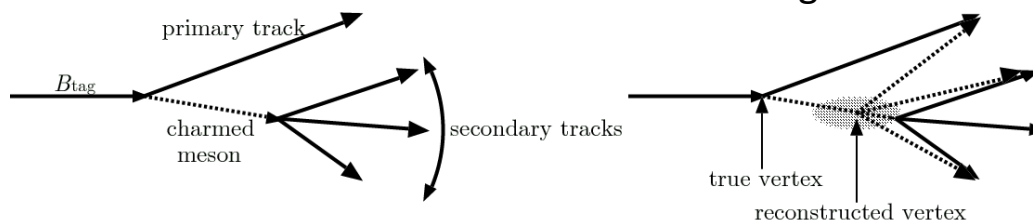
崩壊点vertex と Resolution関数

NIM A 533(2004)370-386



Resolution function \approx 測定値と真値のズレ量を表す分布(分解能)関数

- CP side vertex $R_{ful}(\Delta t)$
- Tag side vertex $R_{asc}(\Delta t)$
- Non-primary track effect to B_{tag} decay $R_{np}(\Delta t)$



- Kinematical approximation $R_k(\Delta t)$

CP-fit PDF (Resolution function無し)

- 確率密度関数(PDF) for CP fit

$$P(\Delta t_i; S, A) = (1 - f_{ol}) \left\{ f_i^{\text{sig}} P_{\text{sig}}(\Delta t_i; S, A) \right. \\ \left. + (1 - f_i^{\text{sig}}) P_{\text{bkg}}(\Delta t_i) \right\} \\ + f_{ol} P_{ol}(\Delta t_i)$$

CP-fit PDF (Resolution function無し)

- 確率密度関数(PDF) for CP fit

$$P(\Delta t_i; S, A) = (1 - f_{ol}) \left\{ f_i^{\text{sig}} P_{\text{sig}}(\Delta t_i; S, A) \right. \\ \left. + (1 - f_i^{\text{sig}}) P_{\text{bkg}}(\Delta t_i) \right\} \\ + f_{ol} P_{ol}(\Delta t_i)$$

$$P_{\text{sig}}(\Delta t; S, A) = \frac{e^{-|\Delta t|/\tau}}{4\tau} \left[1 + q \{ S \sin(\Delta m_d \Delta t) + A \cos(\Delta m_d \Delta t) \} \right]$$

$$P_{\text{bkg}}(\Delta t) = f_{\delta}^{\text{bkg}} \delta^{\text{Dirac}}(\Delta t - \mu_{\delta}^{\text{bkg}}) + (1 - f_{\delta}^{\text{bkg}}) \frac{1}{2\tau_{\text{bkg}}} e^{-|\Delta t - \mu_{\tau}^{\text{bkg}}|/\tau_{\text{bkg}}}$$

$$P_{ol}(\Delta t) = G(\Delta t, \sigma_{ol})$$

CP-fit PDF (Resolution functionあり)

- 確率密度関数(PDF) for CP fit

$$P(\Delta t_i; S, A) = (1 - f_{ol}) \left\{ f_i^{\text{sig}} P_{\text{sig}}(\Delta t_i; S, A) \otimes R_{\text{sig}}(\Delta t_i) \right. \\ \left. + (1 - f_i^{\text{sig}}) P_{\text{bkg}}(\Delta t_i) \otimes R_{\text{bkg}}(\Delta t_i) \right\} \\ + f_{ol} P_{ol}(\Delta t_i)$$

CP-fit PDF (Resolution functionあり)

- 確率密度関数(PDF) for CP fit

$$P(\Delta t_i; S, A) = (1 - f_{ol}) \left\{ f_i^{\text{sig}} P_{\text{sig}}(\Delta t_i; S, A) \otimes R_{\text{sig}}(\Delta t_i) \right. \\ \left. + (1 - f_i^{\text{sig}}) P_{\text{bkg}}(\Delta t_i) \otimes R_{\text{bkg}}(\Delta t_i) \right\} \\ + f_{ol} P_{ol}(\Delta t_i)$$

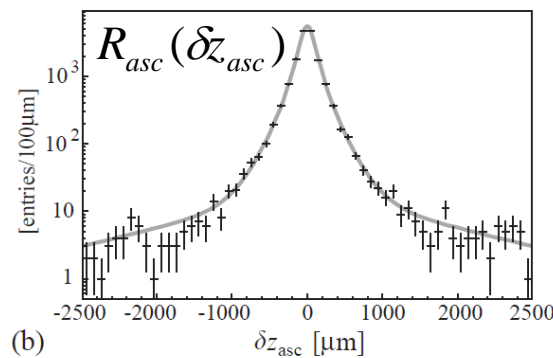
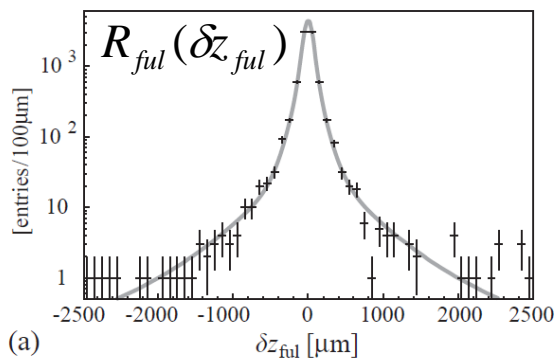
$$R_{\text{sig}}(\Delta t) = \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} d(\Delta t') d(\Delta t'') d(\Delta t''') R_{\text{ful}}(\Delta t - \Delta t') R_{\text{asc}}(\Delta t' - \Delta t'') R_{\text{np}}(\Delta t'' - \Delta t''') R_k(\Delta t''')$$

$$R_{\text{bkg}}(\Delta t) = (1 - f_{\text{tail}}^{\text{bkg}}) G(\Delta t; s_{\text{main}}^{\text{bkg}} \sqrt{\sigma_{\text{ful}}^2 + \sigma_{\text{asc}}^2}) + f_{\text{tail}}^{\text{bkg}} G(\Delta t; s_{\text{tail}}^{\text{bkg}} \sqrt{\sigma_{\text{ful}}^2 + \sigma_{\text{asc}}^2})$$

検出器 Resolution function R_{ful} and R_{asc}

- Belle最終結果はcontrol sample($D\pi, D^*\pi, D^*l\nu, D^0\pi, D^{*0}\pi$)で決定
- Track quality $h = \chi^2_{\text{track}} / \text{ndf}$
- Classified two vertex types

- Multiple-track vertex; $R_q^{\text{multiple}}(\delta z_q) = G(\delta z_q; (s_q^0 + s_q^1 h) \sigma_q)$
- Single-track vertex; $R_q^{\text{single}}(\delta z_q) = (1 - f_{\text{tail}}) G(\delta z_q; s_{\text{main}} \sigma_q^z) + f_{\text{tail}} G(\delta z_q; s_{\text{tail}} \sigma_q^z)$



where $\begin{cases} G; \text{Gaussian} \\ q=ful, asc \end{cases}$

Event by eventで R_{ful} と R_{asc} 変えている

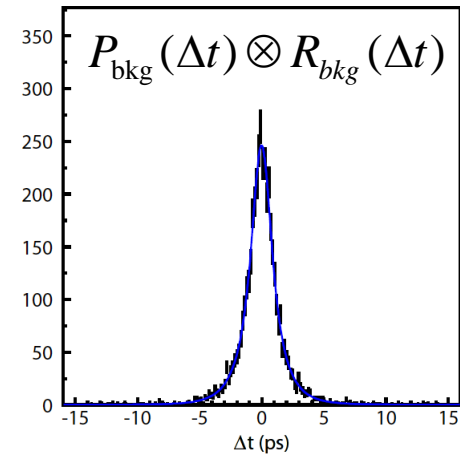
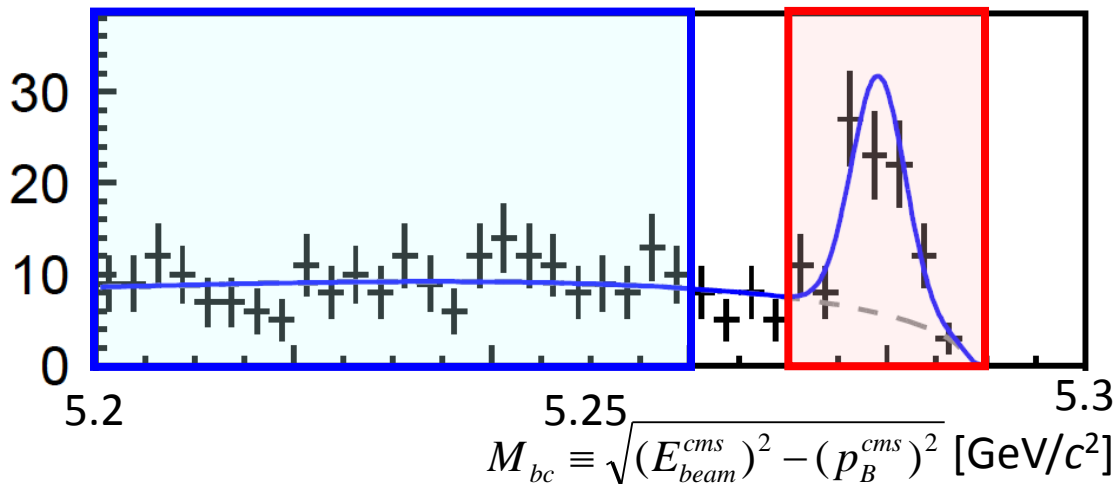
Resolution付きbkg PDF $P_{bkg}(\Delta t_i) \otimes R_{bkg}(\Delta t_i)$

$$P_{bkg}(\Delta t) = f_{\delta}^{bkg} \delta^{Dirac}(\Delta t - \mu_{\delta}^{bkg}) + (1 - f_{\delta}^{bkg}) \frac{1}{2\tau_{bkg}} e^{-|\Delta t - \mu_{\tau}^{bkg}|/\tau_{bkg}}$$

$$R_{bkg}(\Delta t) = (1 - f_{tail}^{bkg}) G(\Delta t; s_{main}^{bkg} \sqrt{\sigma_{ful}^2 + \sigma_{asc}^2}) + f_{tail}^{bkg} G(\Delta t; s_{tail}^{bkg} \sqrt{\sigma_{ful}^2 + \sigma_{asc}^2})$$

sideband region

signal region



$$\left. \begin{array}{l} f_{\delta}^{bkg}, \mu_{\delta}^{bkg}, \tau_{bkg}, \mu_{\tau}^{bkg} \text{ for } P_{bkg}(\Delta t) \\ f_{tail}^{bkg}, s_{main}^{bkg}, s_{tail}^{bkg} \text{ for } R_{bkg}(\Delta t) \end{array} \right\}$$

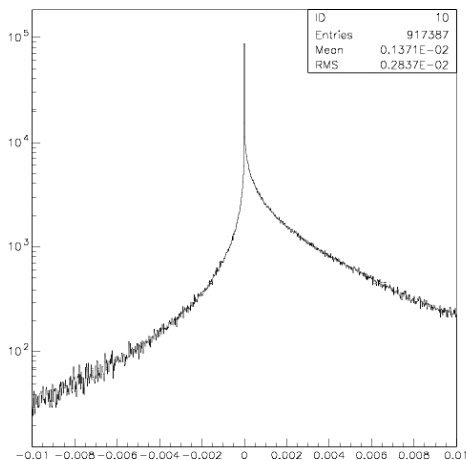
データのsideband regionから
 Δt fit で得る

Non-primary particle resolution $R_{np}(\Delta t)$

$$R_{np}(\delta Z_{asc}) \equiv f_n E_n(\delta Z_{asc}; \tau_{np}^n) + (1 - f_n) \{ f_d \delta^{Dirac}(\delta Z_{asc}) + (1 - f_d) E_p(\delta Z_{asc}; \tau_{np}^p) \}$$



Dirac's delta function



複数track
 $R_{np}^{multi}(\Delta t)$
 where

$$E_p(x; \tau) \equiv \frac{1}{\tau} e^{-x/\tau} \text{ for } x > 0, \text{ otherwise } 0$$

$$E_n(x; \tau) \equiv \frac{1}{\tau} e^{+x/\tau} \text{ for } x \lesssim 0, \text{ otherwise } 0$$

$$\tau_{np}^p = \tau_p^0 + \tau_p^{1h} h + \tau_p^{1s} \sigma_{asc} + \tau_p^2 \sigma_{asc} h$$

$$\tau_{np}^n = \tau_n^0 + \tau_n^{1h} h + \tau_n^{1s} \sigma_{asc} + \tau_n^2 \sigma_{asc} h$$

$$f_\delta = f_\delta^0 + f_\delta^{1h} h' + f_\delta^2 \sigma'_{asc} + f_\delta^2 \sigma'_{asc} h'$$

where $\sigma'_{asc} = \sigma (\sigma_{asc} < \sigma_{th})$ or $\sigma_{th} (\sigma_{asc} > \sigma_{th})$ ($\sigma_{th} = 0.75\text{ps}$)

$h' = h (h < h_{th})$ or $h_{th} (h > h_{th})$ ($h_{th} = 0.35$)

$$h = \chi_{track}^2 / ndf$$

1) 初期値をCharm D meson寿命を0にしたMCで R_{asc} 決定

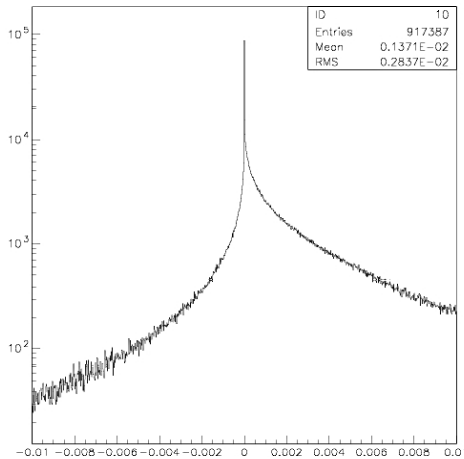
2) その後通常MCを使って $R_{asc} R_{np}$ フィットで決定

Non-primary particle resolution $R_{np}(\Delta t)$

$$R_{np}(\delta Z_{asc}) \equiv f_n E_n(\delta Z_{asc}; \tau_{np}^n) + (1 - f_n) \{ f_d \delta^{Dirac}(\delta Z_{asc}) + (1 - f_d) E_p(\delta Z_{asc}; \tau_{np}^p) \}$$



Dirac's delta function



複数track
 $R_{np}^{single}(\Delta t)$
 where

$$E_p(x; \tau) \equiv \frac{1}{\tau} e^{-x/\tau} \text{ for } x > 0, \text{ otherwise } 0$$

$$E_n(x; \tau) \equiv \frac{1}{\tau} e^{+x/\tau} \text{ for } x \lesssim 0, \text{ otherwise } 0$$

$$\tau_{np}^p = \tau_p^0$$

$$\tau_{np}^n = \tau_n^0$$

$$f_\delta = const$$

1) 初期値をCharm D meson寿命を0にしたMCで R_{asc} 決定

2) その後通常MCを使って $R_{asc} R_{np}$ フィットで決定

力学的近似による resolution $R_k(\Delta t)$

$$\begin{aligned}
 x &\equiv \Delta t - \Delta t_{true} \\
 &= [(\beta\gamma)_{ful} / (\beta\gamma)_Y - 1]t_{ful} - [(\beta\gamma)_{asc} / (\beta\gamma)_Y - 1]t_{asc} \\
 &\sim 1 - 0.165 \cos \theta_B^{cms} (t_{ful} - t_{asc})
 \end{aligned}$$

$$F(x, \Delta t_{true}) = \int_0^\infty \int_0^\infty d(t_{ful}) d(t_{asc}) E_p(t_{ful}; t_B) E_p(t_{asc}; t_B)$$

$$\times \delta^{Dirac}(\Delta t_{true} - (t_{ful} - t_{asc}))$$

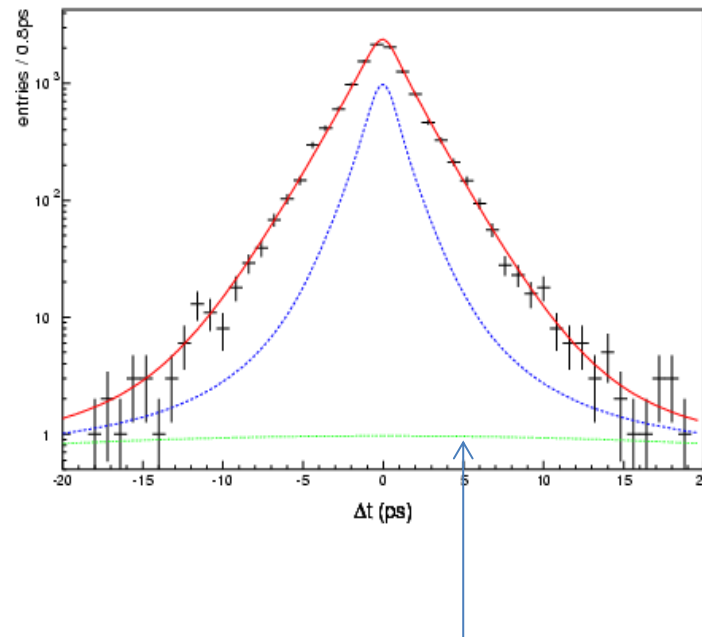
$$\times \delta^{Dirac}(x - \{(\beta\gamma)_{ful} / (\beta\gamma)_Y - 1\}t_{ful} - [(\beta\gamma)_{asc} / (\beta\gamma)_Y - 1]t_{asc})$$

$$R_k(\Delta t) = F(x, \Delta t_{true}) / F(\Delta t_{true}) = \begin{cases} E_p \left(x - \left[\left(\frac{E_B^{cms}}{m_B} - 1 \right) \Delta t_{true} + \frac{p_B^{cms} \cos \theta_B^{cms}}{\beta_\gamma m_B} |\Delta t_{true}| \right]; \right. \\ \left. \left| \frac{p_B^{cms} \cos \theta_B^{cms}}{\beta_\gamma m_B} \right| \tau_B \right) & (\cos \theta_B^{cms} > 0) \\ \delta^{Dirac} \left(x - \left(\frac{E_B^{cms}}{m_B} - 1 \right) \Delta t_{true} \right) & (\cos \theta_B^{cms} = 0). \\ E_n \left(x - \left[\left(\frac{E_B^{cms}}{m_B} - 1 \right) \Delta t_{true} + \frac{p_B^{cms} \cos \theta_B^{cms}}{\beta_\gamma m_B} |\Delta t_{true}| \right]; \right. \\ \left. \left| \frac{p_B^{cms} \cos \theta_B^{cms}}{\beta_\gamma m_B} \right| \tau_B \right) & (\cos \theta_B^{cms} < 0) \end{cases}$$

B中間子の飛んだ方向によるブースト補正

Outliers resolution $R_{ol}(\Delta t)$

↑非常に長寿命に“みえる”イベント



$$R_{ol}(\Delta t) = G(\Delta t, \sigma_{ol})$$

Sometime separate multiple/single outliers, f_{ol}^{single} , f_{ol}^{multiple} are used.

Belle2のResolution function

- Belleのように大統計量コントロールサンプルを用いて決定されたモードを問わずに共通に利用できるものはほぼ未着手
- Belleのように検出器由来、non-primary trackの影響、運動学的近似といった細かいパラメータセットは必要か？BABARのようにtriple Gaussianでブラックボックス化しても良いか、は議論の余地があり

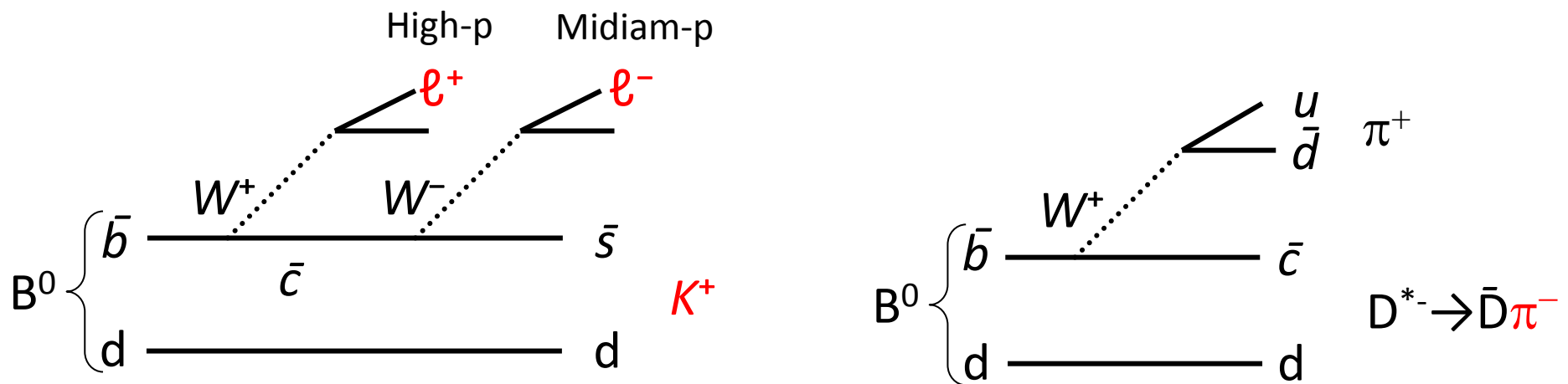
Flavor tag

tagging効率 ε と wrong tag frac. w

$$\begin{aligned}
 p_{sig}^{obs}(\Delta t, q) &= \varepsilon[(1-w)p_{sig}(\Delta t, q) + wp_{sig}(\Delta t, -q)] \\
 &= \varepsilon \frac{e^{-|\Delta t|/\tau}}{4\tau} [1 - (1-2w)q\xi_f \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m_d \Delta t)]
 \end{aligned}$$

Tagging efficiency: ε

Wrong tagging fraction: w



tagging効率 ε と wrong tag frac. w

$$\begin{aligned} p_{sig}^{obs}(\Delta t, q) &= \varepsilon[(1-w)p_{sig}(\Delta t, q) + wp_{sig}(\Delta t, -q)] \\ &= \varepsilon \frac{e^{-|\Delta t|/\tau}}{4\tau} [1 - (1-2w)q\xi_f \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m_d \Delta t)] \end{aligned}$$

Tagging efficiency: ε

Wrong tagging fraction: w

$$\delta(\sin 2\phi_1) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon N_{rec}}} \longrightarrow \delta(\sin 2\phi_1) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(1-2w)N_{rec}}}$$

Tagging効率の向上はCPV測定で重要

tagging効率 ε と wrong tag frac. w

$$p_{sig}^{obs}(\Delta t, q) = \varepsilon[(1-w)p_{sig}(\Delta t, q) + wp_{sig}(\Delta t, -q)]$$
$$= \varepsilon \frac{e^{-|\Delta t|/\tau}}{4\tau} [1 - (1-2w)q\xi_f \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m_d \Delta t)]$$

Tagging efficiency: ε

Wrong tagging fraction: w

高統計になって w がフレーバー毎 w^{B^0} と $w^{\bar{B}^0}$ で違うことが分かる

$$\rightarrow = \varepsilon \frac{e^{-|\Delta t|/\tau}}{4\tau} [1 - q\Delta w - (1-2w)q\xi_f \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m_d \Delta t)]$$

こっちを使っている

$$w = \frac{w^{B^0} + w^{\bar{B}^0}}{2} \quad \Delta w = w^{B^0} - w^{\bar{B}^0}$$

Flavor tagging algorithm

Belleの場合

Flavor specific decays

Leptons

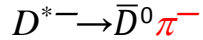
- High- p , from $B^0 \rightarrow X l^+ \nu$
- Medium- p , from $\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s} l^- \bar{\nu}$

Kaons

- $B^0 \rightarrow X K^+$ from $\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s}$

Pions

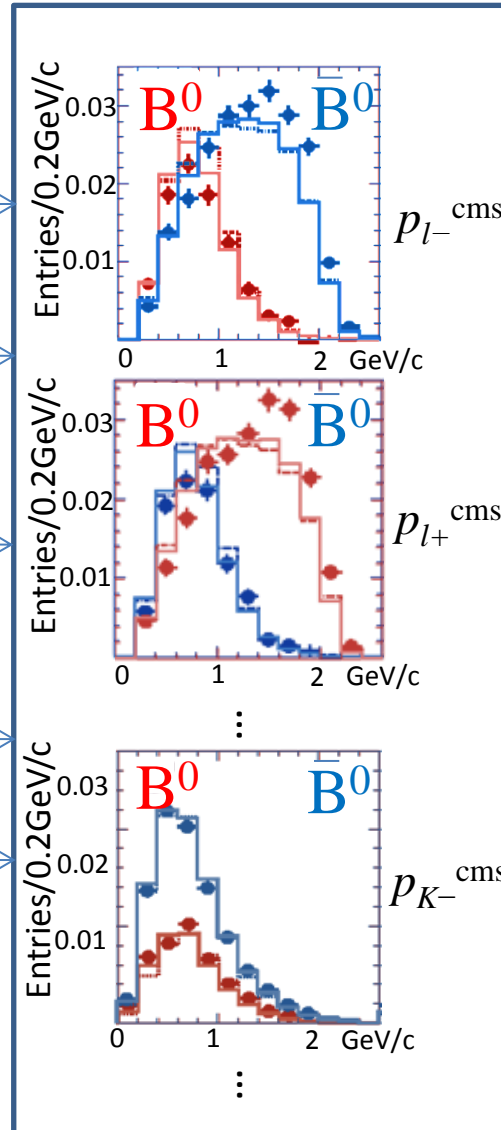
- High- p , from $B^0 \rightarrow D^{(*)} \pi^+ X$
- Low- p , from $B^0 \rightarrow D^{*-} X$,



Λ baryons

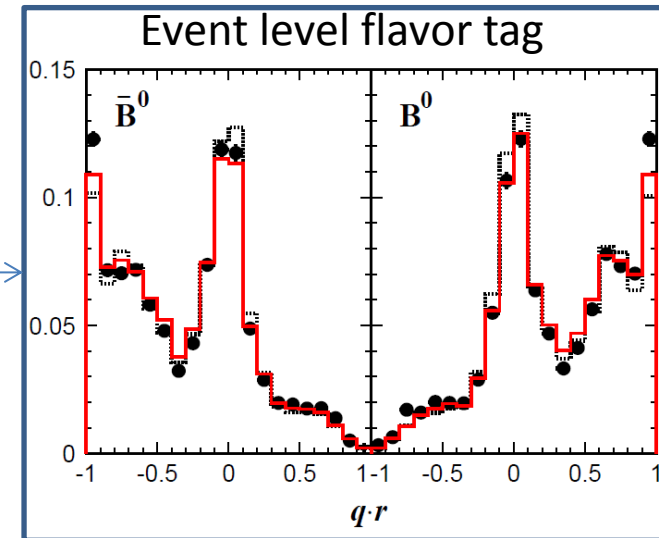
- $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$, $\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s}$

最尤度法
(Likelihood法)



Combine to maximize

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon (1 - 2w)^2$$



Output ($q \cdot r$)

その他の flavor tagging algorithm

- MDLH(Multi Dimensional Likelihood Flavor) Tagger

Belle, NIM A533(2004)516-531

$$\epsilon_{eff} = \epsilon(1-w)^2 = 0.298 \pm 0.004, \text{ PRL}108,171802 \quad S = 0.667 \pm 0.023 \pm 0.012$$

- NN(Neural Network Based) Tagger

BaBar, PRD79, 072009(2009)

$$\epsilon_{eff} = 0.312 \pm 0.003, \text{ PRD}79, 072009(2009)$$

LHCb

$$\epsilon_{eff} = 0.0238 \text{ (J/}\psi\text{Ks)}, \text{ PRB } 721, 24(2013)$$

$$\epsilon_{eff} = 0.0302 \text{ (J/}\psi\text{Ks)}, \text{ PRL } 115, 031601 (2015) \quad S = 0.731 \pm 0.035 \pm 0.020$$

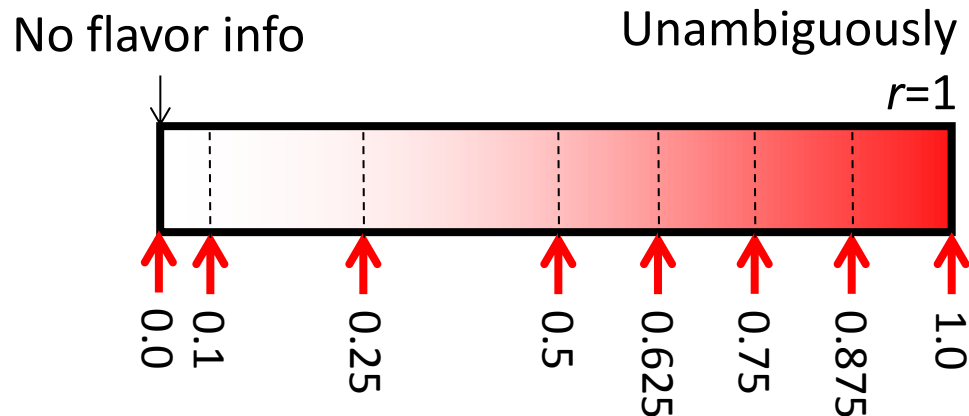
Belle, NN also available with MDLH IEKP-KA/2009-32

Belle2 $\epsilon_{eff} = 0.3584$, TMVA(FastBDT) tagger

Belle2でもMDLH法のTaggerがあったほうがよい？

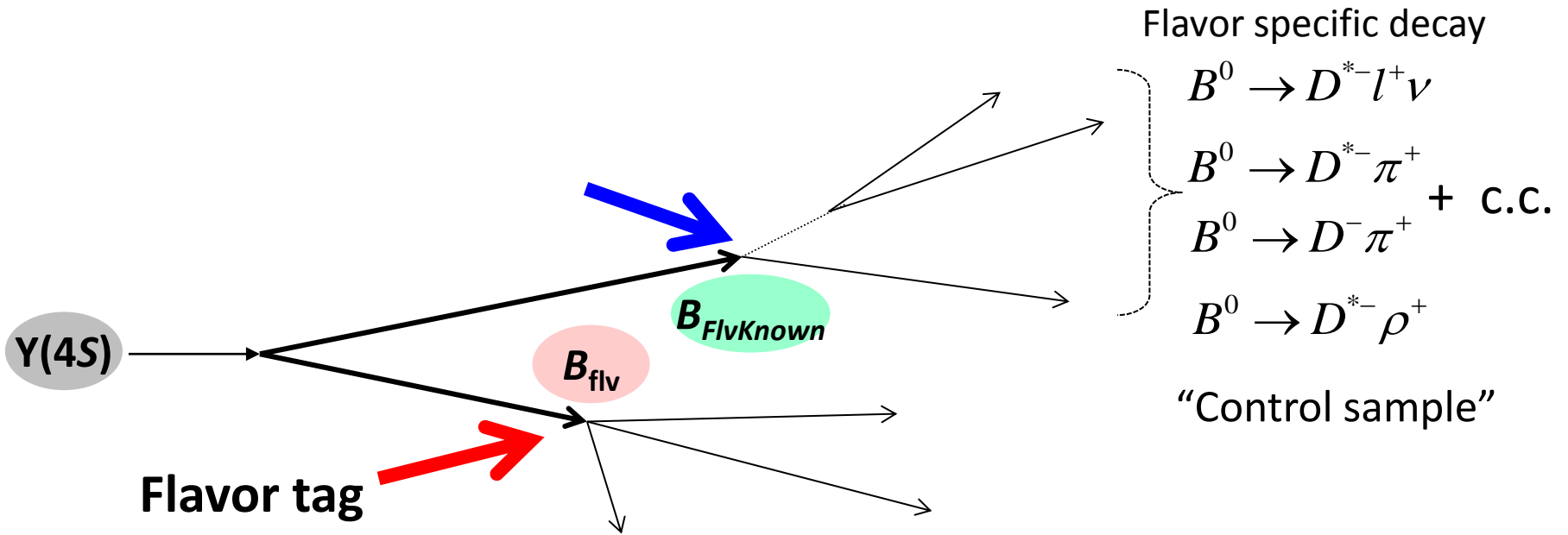
Binned wrong tag fraction w_i

- w_i の決定にMC based tagging algorithmをデータに適用すると
MCのバイアス $r(=1-2w)$ が $\sin 2\phi_1$ 直接伝播する(かもしれない)
→MC based tagging algorithmはデータを r のbin分けにだけ使う
- $\langle r_i \rangle$ を実測で決められればMCのバイアスは入らない
 - × Binned r の導入で ε_{eff} が少し落ちる(が問題ない程度).



どのように w_i を測定するか？

w_i 測定原理

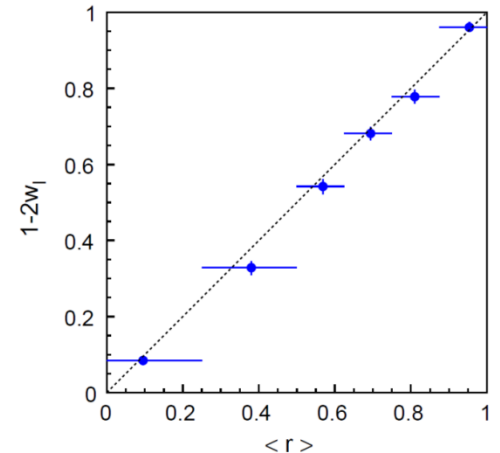
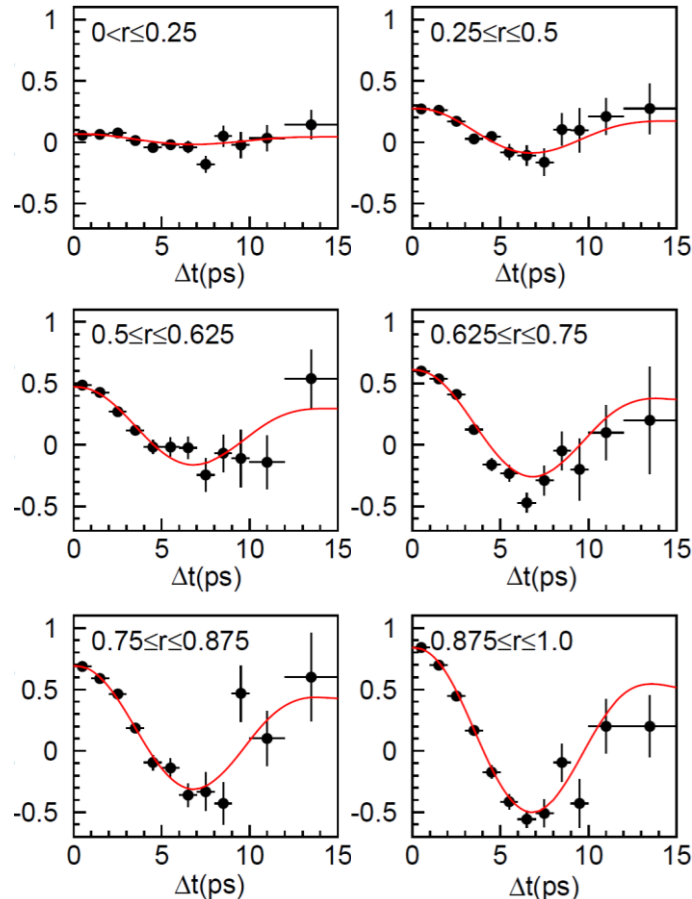
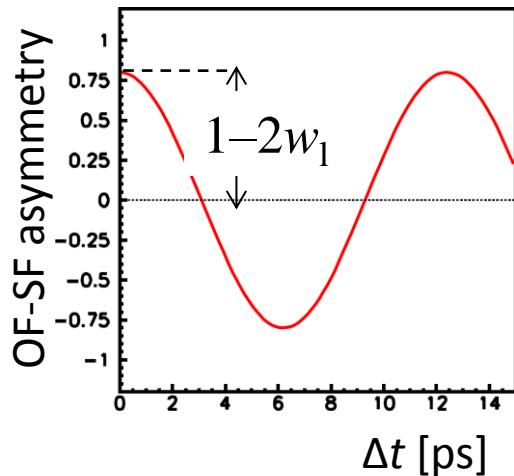


Flavorが特定できる崩壊モードを信号側としてfull reconstructionし
反対のtag側と同じか?(Same Flavor)、反対か?(Opposite Flavor)
の時間変化を見る $\rightarrow w_i$ が分かる

実際の w_i 測定

Opposite Flavor(OF) と Same Flavor(SF) の非対称度 $A_{mix}(\Delta t)$

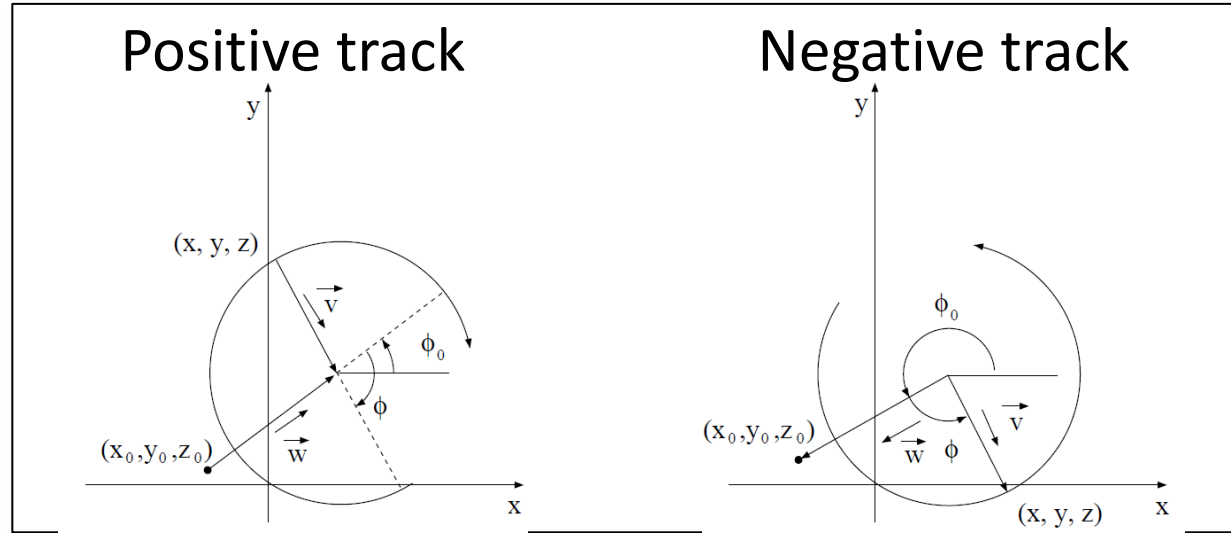
$$P_{OF(SF)}(\Delta t) = \frac{e^{-|\Delta t|/\tau}}{4\tau} [1 - q\Delta w \pm (1 - 2w) \cos(\Delta m_d \Delta t)] , \quad A_{mix}(\Delta t) = \frac{P_{OF} - P_{SF}}{P_{OF} + P_{SF}} = (1 - 2w) \cos(\Delta m_d \Delta t)$$



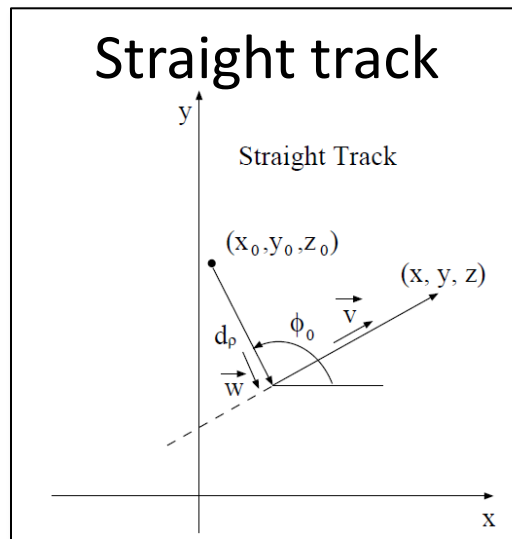
崩壊点再構成Vertexing

Helix Parameters

Charged tracks



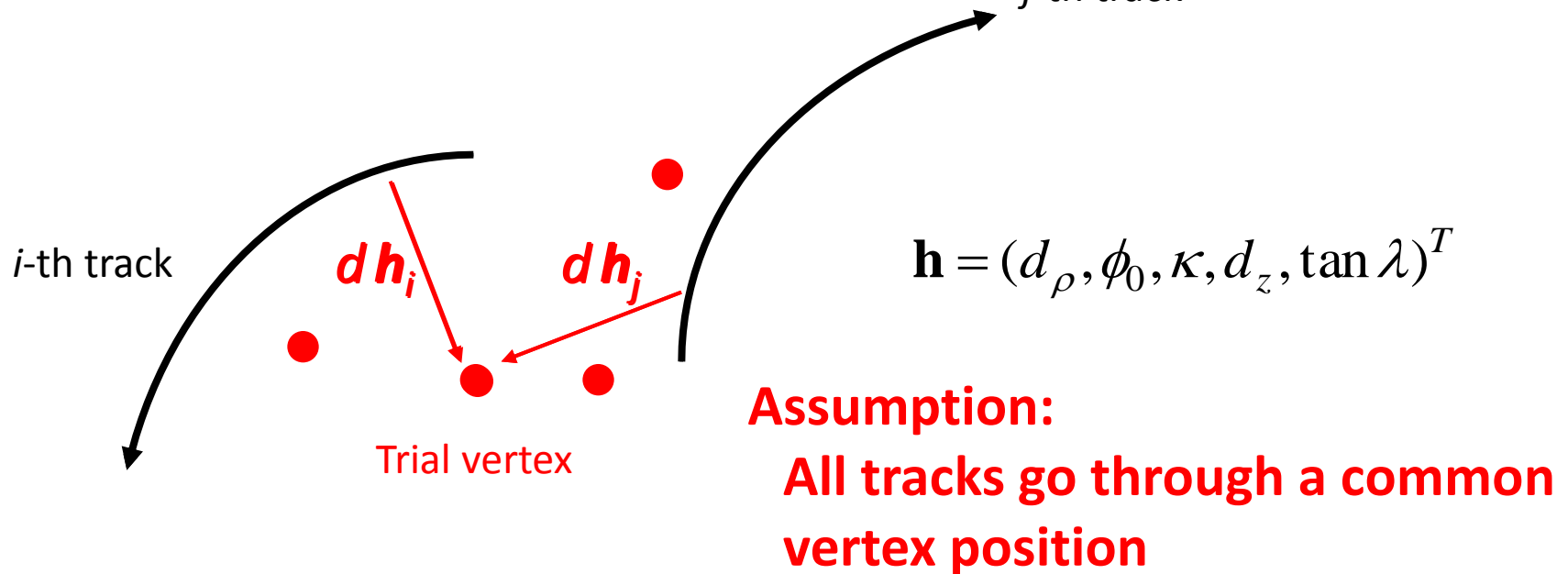
Neutrals etc.



$$\left\{ \begin{array}{l} x(t) = x_0 + d_p \cos \phi_0 - t \sin \phi_0 \\ y(t) = y_0 + d_p \sin \phi_0 + t \cos \phi_0 \\ z(t) = z_0 + d_z + t \tan \lambda \end{array} \right.$$

崩壞点再構成

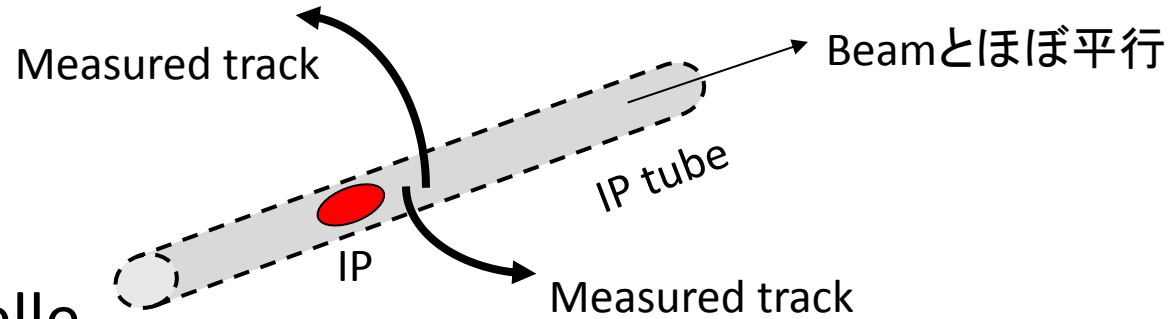
- How to reconstruct the vertex



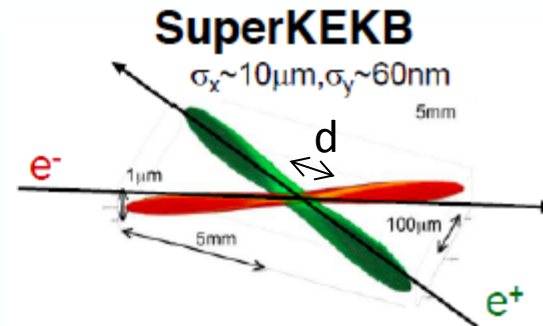
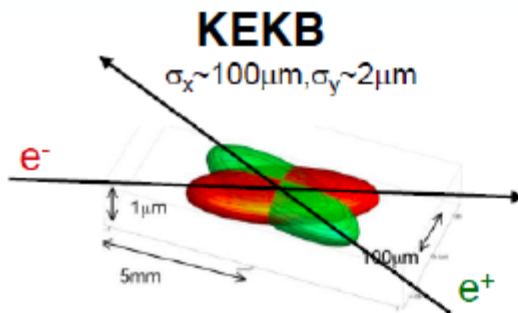
Minimizes ... $\chi_{\text{tracks}}^2 \equiv \delta \mathbf{h}_i^T V_i \delta \mathbf{h}_i + \delta \mathbf{h}_j^T V_j \delta \mathbf{h}_j + \dots$

V_i = Inverse matrix of the i -th track's error matrix

衝突点(Interaction point)からの制約



- IP tube in Belle
 - virtual直線トラック.
 - Momentum direction is $(0,0,1)$ rotated by 11mrad around the y .
 - The IP tube goes through an event-by-event IP.
 - Constraint to tube reduces a bias than to ellipsoid.
- IP (short?) tube in Belle2
 - effective bunch length $d \sim 0.25\text{mm}$, 短いtube、楕円体？



Vertexingの評価指標

- Vertexing goodness(= χ^2 検定)
= amount of track displacements
= at the fitted vertex position

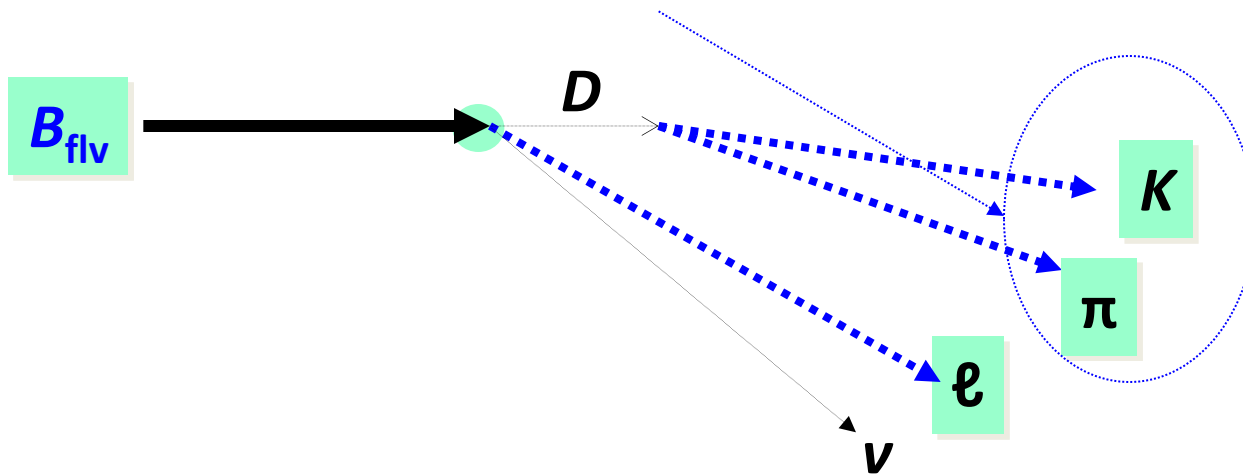
$$\chi_{\text{total}}^2 \equiv \underbrace{(\delta\mathbf{h}_i^T V_i \delta\mathbf{h}_i + \delta\mathbf{h}_j^T V_j \delta\mathbf{h}_j + \dots)}_{\chi_{\text{tracks}}^2} + \chi_{\text{IP-tube}}^2$$

Minimized by
the kfitter

- Event-by-event goodness をCP fitの重みに使用

Tag-Side 崩壊点再構成

Tag-side の終状態粒子には二次、三次粒子
がいるかもしれない

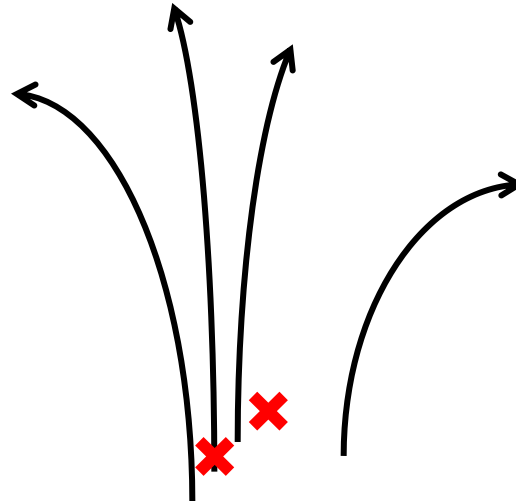


二次、三次粒子が含まれると z_{asc} がずれる可能性
如何に効率よく除外するかが重要

Tag side崩壊点再構成algorithm

- $\chi^2 < 20$ になるまでvertex fit を続ける
- 但し flavor tag lepton は捨てない

χ^2 of the fit < 20, OK!



Belle2のvertexing

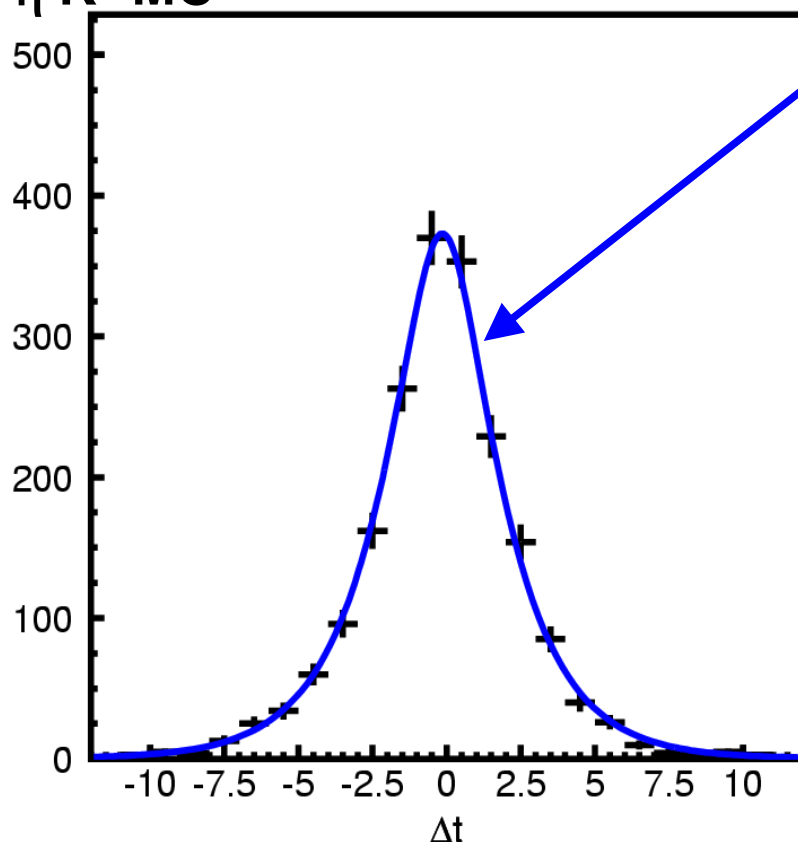
- BelleのvertexingツールをBelle2に移植したもの
- トラックの重み関数を”なました”annealing法など

こういったものを開発するか議論中

Lifetime fit

Event-dep. PDF (Lifetime plot)

$\eta'K^+$ MC



$$P(\Delta t; \tau, \sigma_z, h) = \frac{1}{2\tau} e^{-|\Delta t|/\tau} \otimes R(\sigma_z, h)$$

Lifetime は

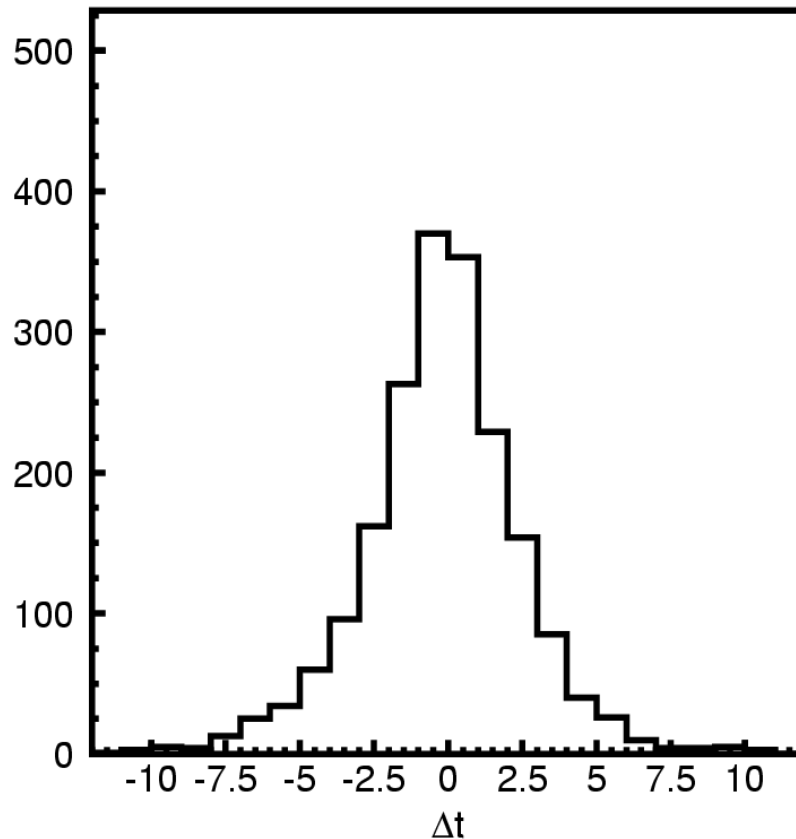
- lifetime(τ)
 - Vertexing error(σ_z) of CP/Tag B
 - reduced $\chi^2(h)$ B vertex points.
- の関数

Fit線は

$F(\Delta t) = N \times P(\Delta t) \times \text{bin width}$
としているわけではない

Event-dep. PDF (Lifetime plot)

ヒストグラム蓄積



First event ...

Second ...

Third ...

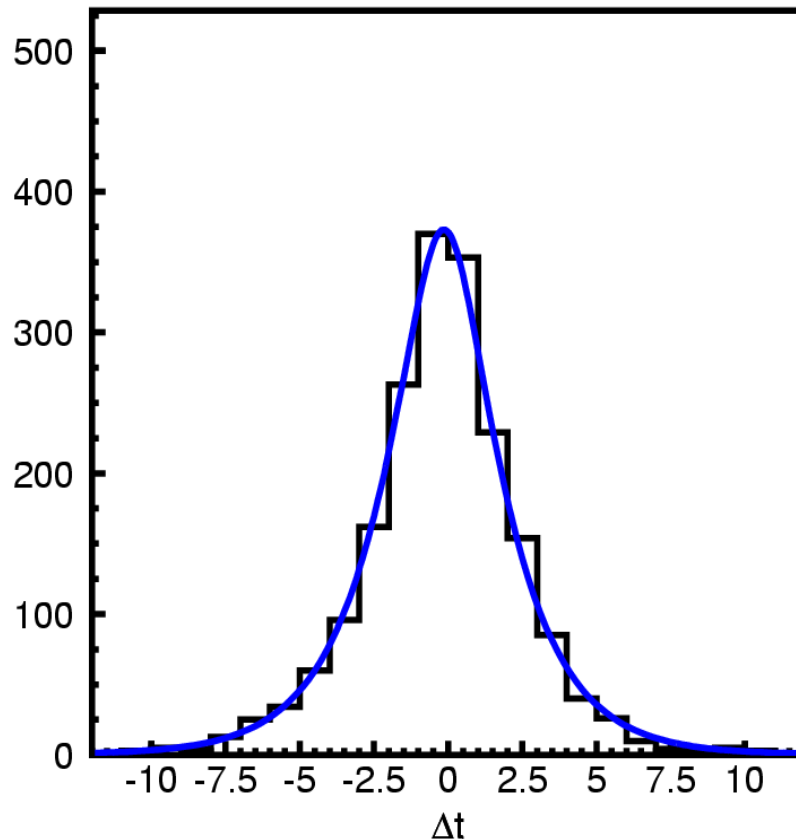
Ten events ...

hundred events ...

Thousand events ...

Event-dep. PDF (Lifetime plot)

フィット線蓄積



normalization

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(A, S; \Delta t) d\Delta t = 1$$

One event ...

Two events ...

Three events ...

Ten events ...

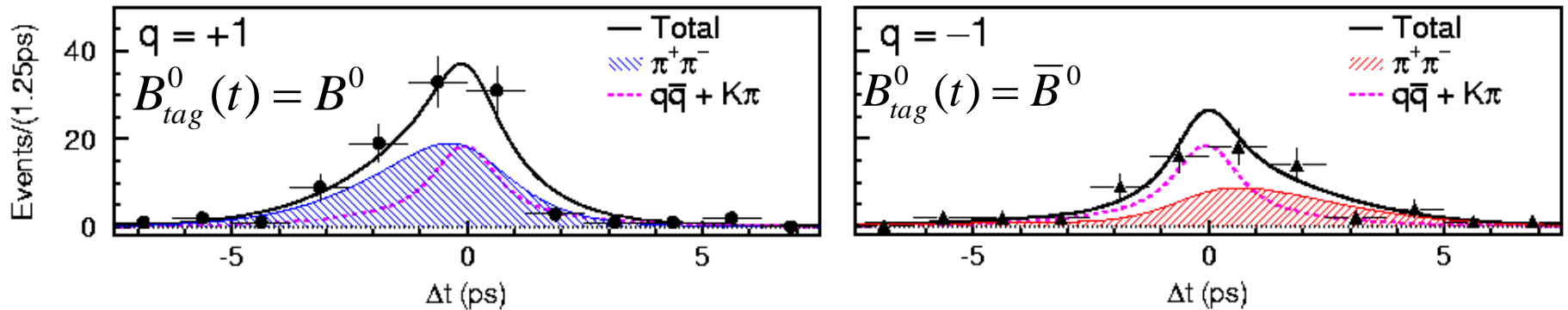
Hundred events ...

Thousand events ...

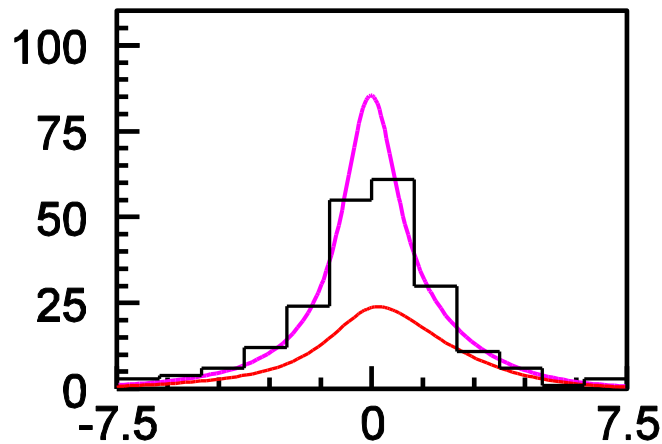
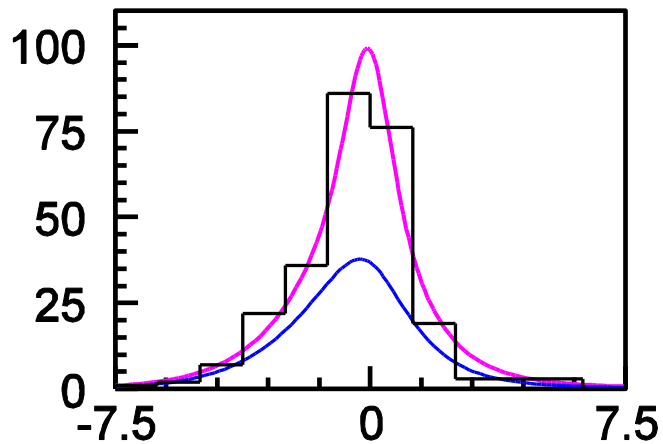
CP-fit(Lifetime fit for each flavor)

Event-dep. plot (PTD for CPV)

$\pi^+\pi^-$ case: proper time distributions for each flavor.

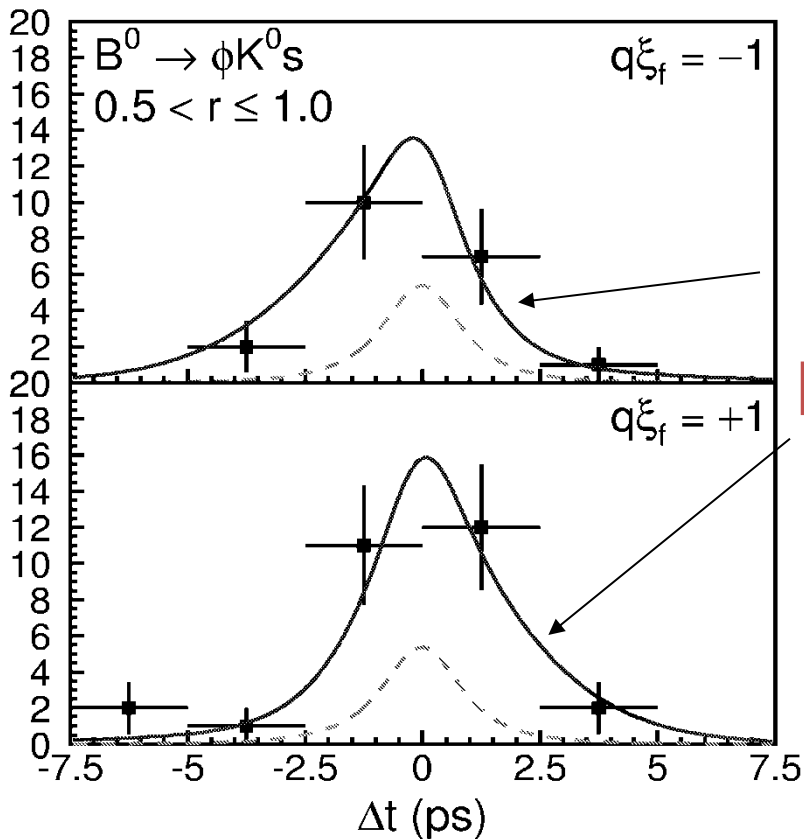


normalization:
$$\sum_{q=-1,+1} \int_{-\infty}^{\infty} P(A, S; q, \Delta t) d\Delta t = 1$$



- 1 event ...
- 2 events ...
- 3 events ...
- 10 events ...
- 100 events ...
- 483 events

Raw asymmetry plot (line)

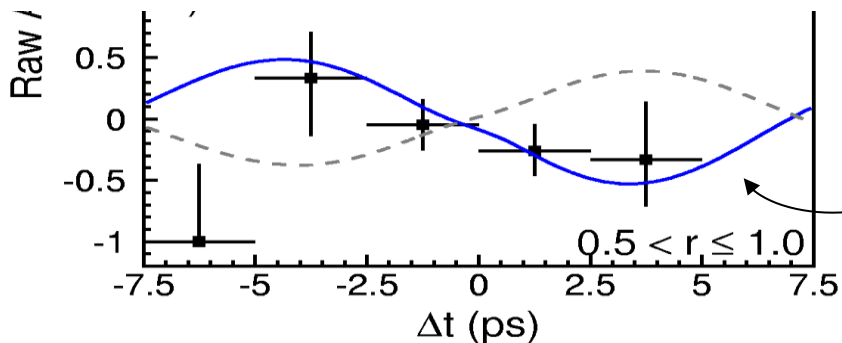


expected curves of proper time.

$P^-(\Delta t)$

$P^+(\Delta t)$

expected curves of asymmetry.



$$A_{CP}(\Delta t) = \frac{P^+(\Delta t) - P^-(\Delta t)}{P^+(\Delta t) + P^-(\Delta t)}$$

Systematic error

Belle $\sin 2\phi_1$ 系統誤差

PRL108,171802(2012)

TABLE III. Systematic errors in \mathcal{S}_f and \mathcal{A}_f in each f_{CP} mode and for the sum of all modes.

			$J/\psi K_S^0$	$\psi(2S)K_S^0$	$\chi_{c1}K_S^0$	$J/\psi K_L^0$	All
irreducible とされている	Vertexing	\mathcal{S}_f	± 0.008	± 0.031	± 0.025	± 0.011	± 0.007
		\mathcal{A}_f	± 0.022	± 0.026	± 0.021	± 0.015	± 0.007
	Δt resolution	\mathcal{S}_f	± 0.007	± 0.007	± 0.005	± 0.007	± 0.007
		\mathcal{A}_f	± 0.004	± 0.003	± 0.004	± 0.003	± 0.001
irreducible とされている	Tag-side interference	\mathcal{S}_f	± 0.002	± 0.002	± 0.002	± 0.001	± 0.001
		\mathcal{A}_f	$^{+0.038}_{-0.000}$	$^{+0.038}_{-0.000}$	$^{+0.038}_{-0.000}$	$^{+0.000}_{-0.037}$	± 0.008
	Flavor tagging	\mathcal{S}_f	± 0.003	± 0.003	± 0.004	± 0.003	± 0.004
		\mathcal{A}_f	± 0.003	± 0.003	± 0.003	± 0.003	± 0.003
	Possible fit bias	\mathcal{S}_f	± 0.004	± 0.004	± 0.004	± 0.004	± 0.004
		\mathcal{A}_f	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005	± 0.005
	Signal fraction	\mathcal{S}_f	± 0.004	± 0.016	< 0.001	± 0.016	± 0.004
		\mathcal{A}_f	± 0.002	± 0.006	< 0.001	± 0.006	± 0.002
	Background Δt PDFs	\mathcal{S}_f	< 0.001	± 0.002	± 0.030	± 0.002	± 0.001
		\mathcal{A}_f	< 0.001	< 0.001	± 0.014	< 0.001	< 0.001
	Physics parameters	\mathcal{S}_f	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001	± 0.001
		\mathcal{A}_f	< 0.001	< 0.001	± 0.001	< 0.001	< 0.001
Total		\mathcal{S}_f	± 0.013	± 0.036	± 0.040	± 0.021	± 0.012
		\mathcal{A}_f	$^{+0.045}_{-0.023}$	$^{+0.047}_{-0.027}$	$^{+0.046}_{-0.026}$	$^{+0.017}_{-0.041}$	± 0.012

過去の系統誤差

Belle

irreducible?

	S(2012)	A(2012)	S(2006)	A(2006)	S(2003)	S(2002)
Vertexing	0.007	0.007	0.012	0.009	0.013	0.022
Tag side interference	0.001	0.008	0.001	0.009	0.001*	N/A
Total	0.012	0.012	0.017	0.014	0.023	0.035

LHCb

*Phys.Rev.D68 034010,2003

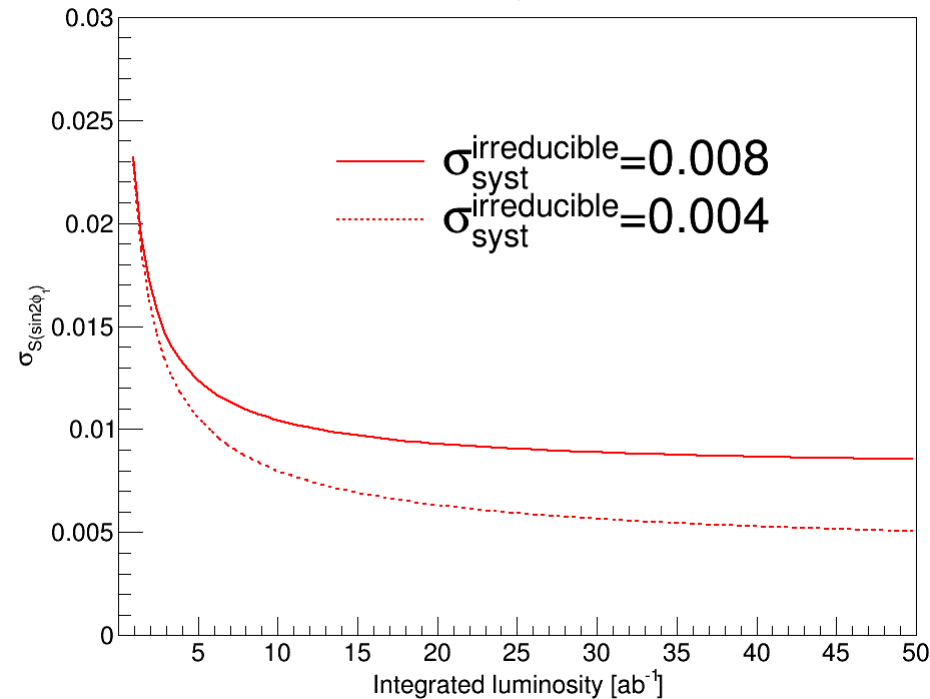
$\Gamma=1/\tau_B$

	S(2015)	S(2012)
Background tagging asymmetry	0.0179	-
Tagging calibration	0.0062	0.034
$\Delta\Gamma$ (decay width)	0.0047	-
Fraction of wrong PV component	0.0021	-
z-scale	0.0012	<0.001
Total	0.020	0.036

まずはクイックに結果を出すことが重要。
 その後のアップデート(系統誤差を減らすに)は検出器の深い理解が不可欠

Belle2 $\sin 2\phi_1$ 精度 (J/ ψ K_S)

S = $\sin 2\phi_1$ precision



$$\sigma_S = \sqrt{\sigma_{\text{stat}}^2 \times \frac{0.711[\text{ab}^{-1}]}{L_{\text{int}}[\text{ab}^{-1}]} + \sigma_{\text{syst}}^{\text{reducible}^2} \times \frac{0.711[\text{ab}^{-1}]}{L_{\text{int}}[\text{ab}^{-1}]} + \sigma_{\text{syst}}^{\text{irreducible}^2}}$$

Belleの $\sin 2\phi_1$ 結果(統計+系統誤差)
をBelle2のLuminosityに外挿。

- Belle検出器は優秀だった
- 我々のBelle検出器への理解も深かった
- ただ目指す物理の統計が足りない→Belle2
- Belle2検出器はもっと優秀であってほしい

Vertexing系統誤差

irreducible?な

Vertexingの系統誤差の内訳

Belle 711fb⁻¹(最終結果)

Vertexing detail	dS	dA
IP tube constraint vertex fit	0.0072	0.0005
Poor-quality vertex rejection	0.0064	0.0021
Imperfect SVD alignment	0.0056	0.0040
Δz bias	0.0050	0.0073
Track error estimation	0.0033	0.0060
Track rejection in B_{tag} decay vertexing	0.0026	0.0015
Δt fit range	0.0002	0.0004
Total	0.012	0.009

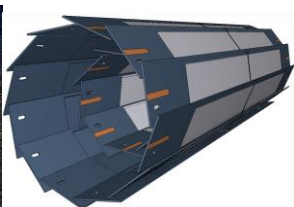
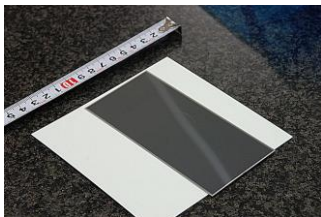
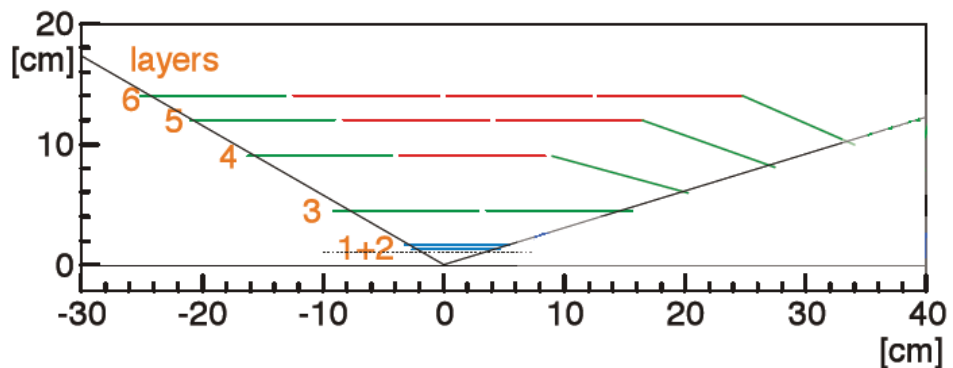
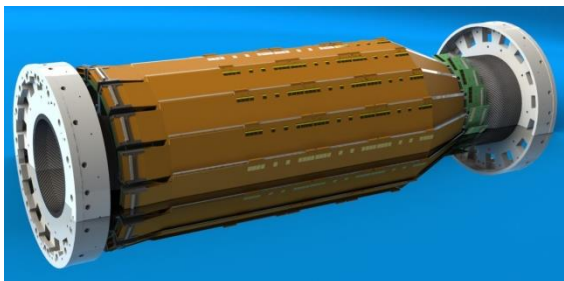
Belle 140fb⁻¹

Item	$\delta \sin 2\phi_1$	$\delta \lambda $
IP profile	+0.0002 -0.0024	+0.0020 -0
Track selection (dr cut)	+0 -0.0061	+0.0016 -0
Track selection (σz cut)	+0.0008 -0.0031	+0 -0.0015
scale_error	+0.0021 -0	+0.0031 -0
Fit range ($ \Delta t $ cut)	+0 -0.0020	+0.0008 -0
Vertex selection (ξ cut)	+0 -0.0073	+0.0058 -0
Δz bias	+0.0032 -0	+0.0097 -0.0052
Alignment	+0.0079 -0.0079	+0.0027 -0.0027
Total	+0.0088 -0.0132	+0.0123 -0.0061
Total (symmetrized)	± 0.013	± 0.012

今からできるBelle2の系統誤差を減らす方法

→Vertex検出器を更に精密に作る(ミスアライメントを減らす方向)

Belle2崩壊点検出器



Layer	Radius [mm]	Ladder #	sensor/ladder	Total sensor
6	135	16	5	80
5	105	12	4	48
4	80	10	3	30
3	38	8	2	16
2	22	12	2	24
1	13	8	2	16

SVD 両面シリコンストリップ検出器4層

PXD シリコンピクセル検出器2層

Belle2崩壊点検出器は4層のSVDと2層のPXDからなる半導体位置検出器

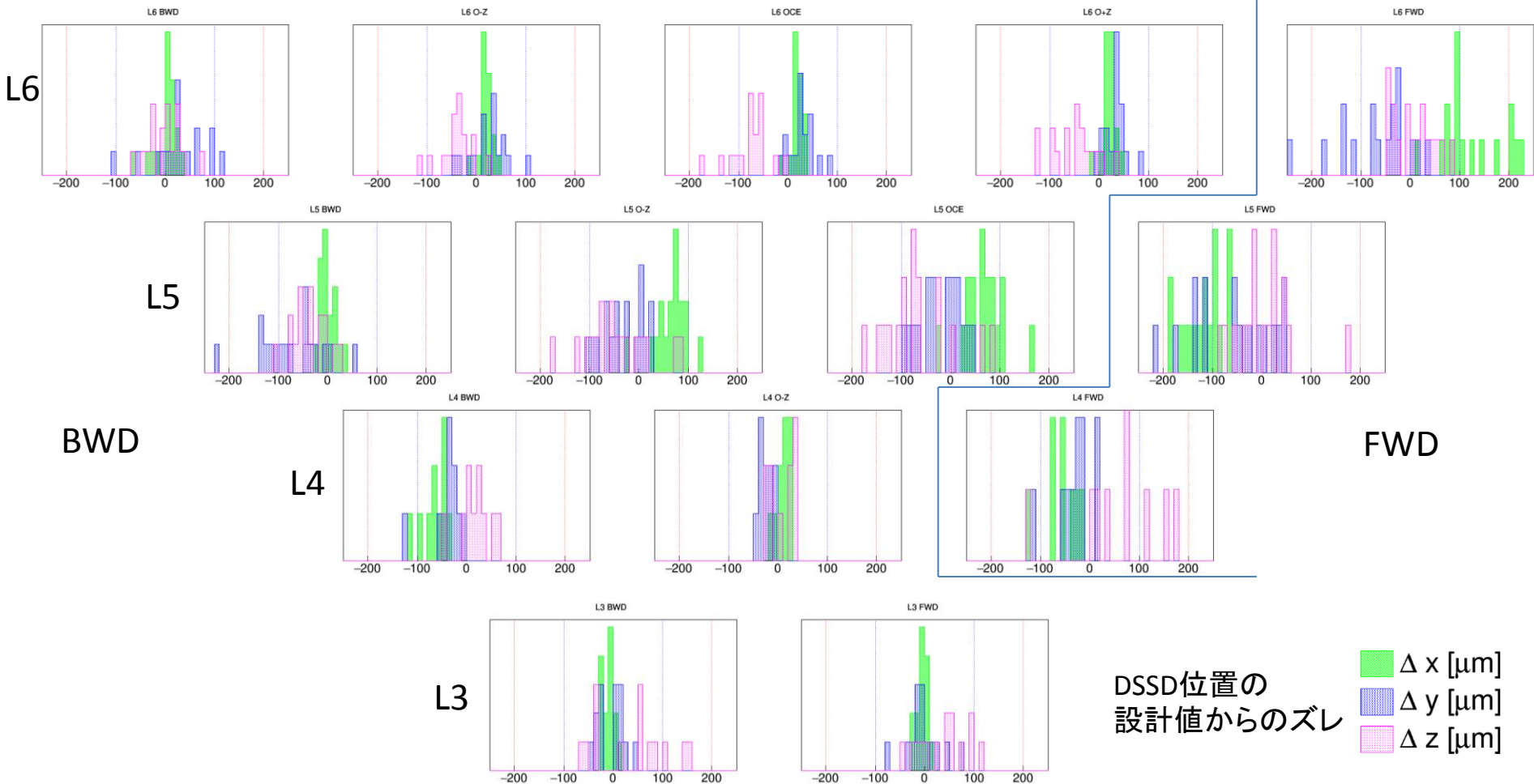
崩壊点検出器アライメント比較

	Belle/崩壊点検出器		Belle2/崩壊点検出器	
	測定	アライメント法	測定	アライメント法
ラダー組立(DSSD)	なし	外形寸法 $\sim 40\mu\text{m}$	三次元測定	アクティブ $\lesssim 10\mu\text{m}$
SVD組立(ラダー)	なし	機械精度 $O(100\mu\text{m})$	三次元測定	SVDx3 ~ 4 , PXD $O(100\mu\text{m})$
Belle(SVD)	宇宙線 μ -pair	ソフトウェア <ul style="list-style-type: none"> ローカル(DSSD) グローバル(SVD) 	DSSD,ラダー 測定情報	ソフトウェア <ul style="list-style-type: none"> ローカル(DSSD) グローバル?(ラダー) グローバル(SVD)
			宇宙線 μ -pair	
<p>on axis track</p> <p>off axis track</p> <p>μ-pair</p> <p>宇宙線</p>	<p>SVD1...on axis track</p> <p>SVD2...+= off axis track</p>	<p>求む！こんな宇宙線</p> <p>Millipede-II</p>		
到達(目標)精度	シフト $10\mu\text{m}$, 回転 0.1mrad		シフト $5\mu\text{m}$?, 回転 0.05mrad ?	

DSSDアライメントコンスタント

ストレート部

スラント部



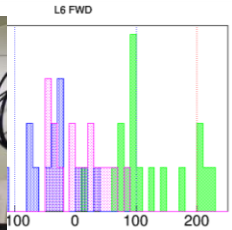
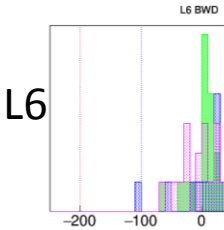
超高精度($\Delta x, \Delta y, \Delta z \lesssim 100 \mu\text{m}$)SVDラダー鋭意量産中(L4, L6)

@Kavli IPMU

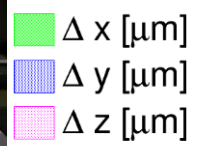
DSSDアライメントコンスタント

ストレート部(四角形DSSD)

スラント部(台形DSSD)



L6
L5
BWD



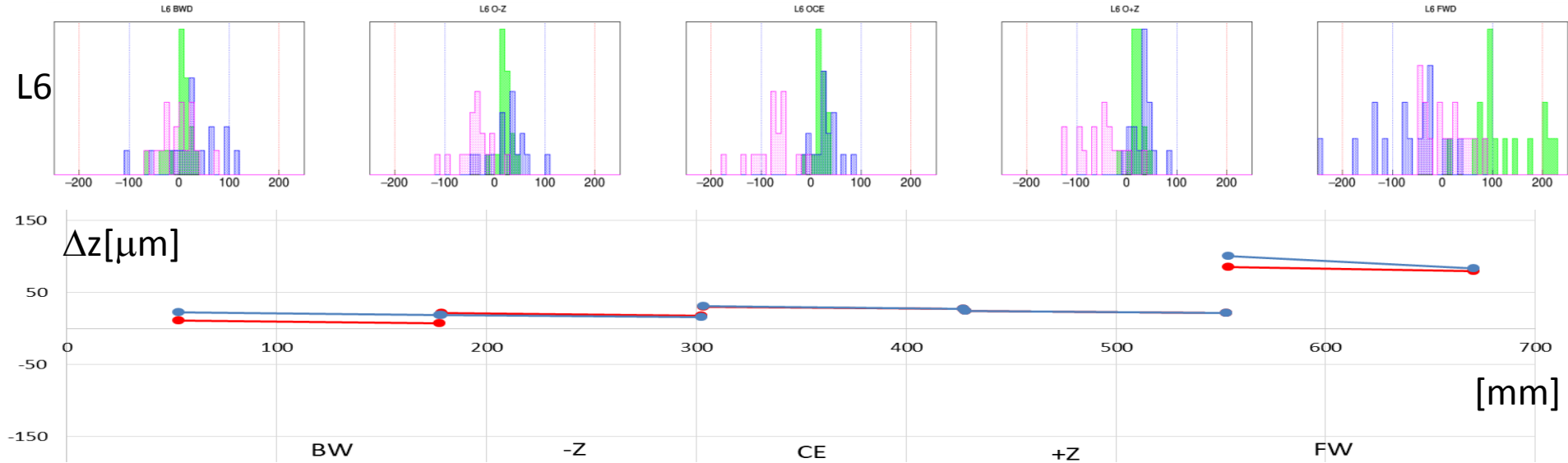
超高精度($\Delta x, \Delta y, \Delta z \lesssim 100\mu\text{m}$)SVDラダー一鋭意量産中(L4,L6)

@Kavli IPMU

DSSDアライメントコンスタント

ストレート部(四角形DSSD)

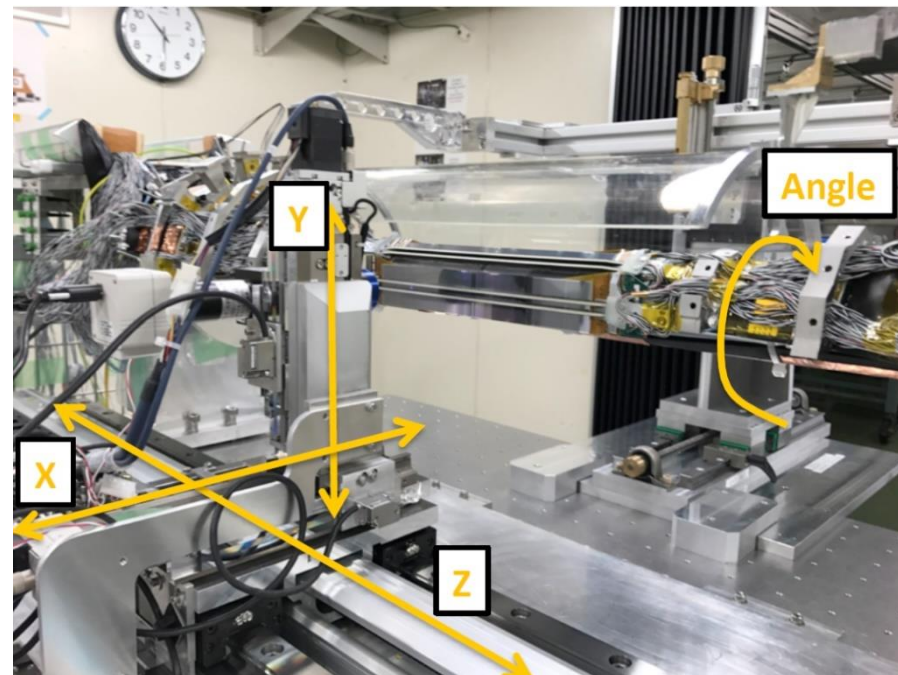
スラント部(台形DSSD)



- Belle2ではDSSDセンサーを能動的に(アクティブ)アライメント→精度 $\leq 10\mu\text{m}$
- Belle2/Belle比でラダー製造時のローカルミスアライメント $\leq 1/2$
- PXDについても同等
- 更にミスアライメントを三次元測定器で実測定(Belleではやっていない)
→アライメント補正の初期値として入力

現デザイン下において実現可能な最高精度(になったと思っている)

ラダーアライメント



- 支持構造体の機械精度はBelleより少し悪い
 - 大型化のため構造体の一体切削加工が出来ないため
 - 三次元測定器で誤差を実測定しているため問題無い
- SVDラダーのミスアライメントを三次元測定器で実測定
 - Belleではやっていない
 - 但し90° 方向のみ(重力方向が実験時と異なる)
 - アライメント補正の初期値として入力

まとめ

- Belle2でのCP物理
 - Belle2は新物理探索実験
 - とは言っても参照先(コントロールサンプル)として標準理論dominantなCPモード測定の重要性は全く揺らがない→両方重要
 - 常に両方のアップデートが必要
 - CPの解析は沢山の解析要素を含み、それぞれが重要なピース
 - 沢山の人が関わってやっと一つの結果になる
 - 精密にやればやるほど検出器への深い理解が必要
 - Belleの経験を踏まえたResolution function、vertexing, taggerなどなどのツール開発はまだまだこれから

いよいよ実験が動いてデータがでます。
物理解析を通して大きな貢献をするチャンス！
ぜひ一緒にやりましょう！